



Facultat de Nàutica de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero

PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor: Bosch Martí, Adrià

Titulació: ET Naval de Propulsió i Serveis del vaixell

Director: Ordás Jiménez, Santiago

Barcelona, setiembre 2011

Debería darle las gracias a muchas personas por este trabajo, pero sobretodo hay dos a las que estoy especialmente agradecido. La primera es el director de mi proyecto el Sr. Santiago Ordás por haberme dedicado su tiempo. Pero también le agradezco de corazón a mi madre por su apoyo y confianza en mí.

INDICE DEL PROYECTO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVOS Y PROPÓSITOS	7
3.	EL BIOGÁS	9
3.1.	Historia del biogás	11
3.2.	Beneficios del biogás	12
3.2.1.	Beneficios energéticos	13
3.2.2.	Beneficios medioambientales	13
3.2.3.	Beneficios económicos	14
3.2.4.	Beneficios socioeconómicos	14
3.3.	La digestión anaerobia	15
3.3.1.	Características del proceso	15
3.3.2.	Parámetros importantes	18
3.3.2.1.	Ausencia de oxígeno	18
3.3.2.2.	Masa seca (MS)	19
3.3.2.3.	Masa volátil (MV)	19
3.3.2.4.	Carga orgánica volumétrica (COV)	20
3.3.2.5.	Temperatura	20
3.3.2.6.	Tiempo de retención hidráulica (TRH)	22
3.3.2.7.	Acidez y Alcalinidad	24
3.3.2.8.	Agitación	26
3.3.2.9.	Factores que inhiben la producción de biogás	27
4.	BIOMASA UTILIZADA Y PRODUCCIÓN DE BIOGAS	29
4.1.	Aguas negras	30
4.1.1.	Cantidad de biomasa	30
4.1.2.	Características de la biomasa	31
4.1.3.	Cantidad de biogás producido	32
4.2.	Comida desperdiciada	34
4.2.1.	Cantidad de biomasa	34
4.2.2.	Características de la biomasa	36
4.2.3.	Cantidad de biogás producido	36
4.3.	Desechos de cocinas	38
4.3.1.	Cantidad de biomasa	38

4.3.2.	Características de la biomasa	38
4.3.3.	Cantidad de biogás producido	39
5.	DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN	41
5.1.	Zona pretratamientos	42
5.1.1.	Trituración	43
5.1.2.	Tanque de alimentación	44
5.1.2.1.	Dimensionamiento	45
5.1.2.2.	Mezcla	46
5.1.2.3.	Temperatura	47
5.1.2.4.	Bombeo	47
5.2.	Digestor	48
5.2.1.	Elementos	51
5.2.1.1.	Cubierta	51
5.2.1.2.	Aislamiento	52
5.2.1.3.	Calefacción de los digestores	53
5.2.1.4.	Agitadores	54
5.2.1.5.	Tuberías, válvulas y desagües	55
5.2.2.	Dimensionamiento	56
5.3.	Zona de deshidratación	58
5.3.1.	Tanque de descarga y tratamientos	58
5.3.2.	Utilización del biol	60
5.4.	Zona de cogeneración	61
5.4.1.	Captación y transporte del biogás	62
5.4.2.	Eliminación de H ₂ O	63
5.4.3.	Eliminación de H ₂ S	64
5.4.4.	Corrección, calibración y control de presión	66
5.4.5.	Antorcha	67
6.	ASPECTOS TECNICO-ECONÓMICOS	68
6.1.	Descarga residuos MARPOL	68
6.2.	Venta del Biol	69
6.3.	Biogás producido	70
6.4.	Espacio utilizado	72
7.	CONCLUSIONES	74

8. ÍNDICE TABLAS, GRÁFICAS, ILUSTRACIONES Y ESQUEMAS	76
8.1. Tablas	76
8.2. Esquemas	76
8.3. Gráficas	76
8.4. Ilustraciones	77
9. BIBLIOGRAFÍA	78

1. INTRODUCCIÓN

Los cruceros por el Mediterráneo, Caribe, etc. son cada vez más frecuentes. Se ha convertido en una de las maneras de pasar las vacaciones preferidas por la gente. Lógicamente al aumentar la demanda de plazas en los cruceros se están construyendo cruceros cada vez más grandes y que puedan albergar muchos más pasajeros. La tecnología naval ha evolucionado exponencialmente durante la última década, hasta el punto de poder construir un buque de pasajeros de 360 metros de eslora y con una capacidad de casi 6300 pasajeros y 2000 tripulantes.

Aunque los cruceros son una divertida y lujosa manera de pasar las vacaciones, también tienen sus defectos. Un buque de más de 8400 personas es como un pueblo pequeño e igual que en tierra todas estas personas generan una gran cantidad de residuos al día.

Según el anexo IV del MARPOL (Convenio Internacional para la prevención de la contaminación de los buques), las aguas sucias (aguas grises y negras) generadas en el buque pueden ser tiradas al mar si han sido desmenuzadas y desinfectadas previamente. Cuando se redactó este convenio, los cruceros existentes tenían alrededor de 2000 pasajeros. La cantidad de aguas sucias vertidas podía ser asimilada por el mar sin dejar grandes zonas con residuos. Los cruceros actuales generan 3 veces más de aguas sucias, pudiendo dejar grandes clapas en el mar de las aguas provenientes de sanitarios, duchas, cocinas, lavanderías, etc. Además, si la ruta que realiza el crucero es por mares pequeños como el Mediterráneo y viaja relativamente cerca de tierra, la probabilidad de que los residuos lleguen a las proximidades de la costa o incluso hasta las playas es muy alta.

También, según el anexo V del MARPOL, las basuras orgánicas pueden tirarse al mar siempre y cuando se hayan triturado o desmenuzado previamente. Para alimentar a todos los pasajeros y tripulación del buque se necesitan grandes cantidades de alimentos de los cuales una parte, más del 20% de estos alimentos, terminará en la basura y por consiguiente en el mar. Un crucero de estas características puede llegar a generar y verter al mar más de 2200 toneladas anuales de residuos. Es evidente que

hay que buscar una solución para esta nueva generación de supercruceros capaces de contaminar tanto los mares.

Hay cruceros que no tienen planta de tratamiento de aguas sucias y basuras y necesitan almacenar todos los residuos generados. Este método ayuda a la prevención y no contaminación del mar, pero tiene el inconveniente de que se necesitan grandes tanques de almacenamiento del residuo. Este espacio utilizado para los tanques es dinero perdido, al no poder ser utilizado para camarotes u otros servicios del buque que aumenten sus actividades lúdicas y lo hagan un crucero más atractivo. Además, la descarga de los residuos al llegar a puerto tiene un coste al estar obligados a contratar una empresa para que efectúe la operación y por lo tanto se incrementan los gastos de operación del crucero.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta es el energético. Cada vez más salen estudios sobre el agotamiento de los yacimientos petrolíferos en el mundo y la mayoría coinciden en que dentro de aproximadamente 50 años, no habrá petróleo suficiente para la industria y transportes. La situación energética actual requiere la búsqueda de nuevas tecnologías capaces de suplir la mayoría de los combustibles fósiles. Además, este tipo de combustibles favorecen el efecto invernadero y al calentamiento global del planeta, contaminando la atmosfera y destruyendo la capa de ozono. Es necesario que las nuevas tecnologías, no solo permitan la sustitución de los combustibles fósiles, sino que disminuyan las emisiones de CO₂ a la atmosfera y reduzcan el cambio climático que está sufriendo el planeta.

El inconveniente de estas nuevas tecnologías, es que hay un gran riesgo de fracaso ya que no tienen un precedente de referencia. Además, suelen utilizar instalaciones bastante caras debido a su alto grado de complejidad, pero si se realizan correctamente pueden llegar a ser muy rentables e incluso generar beneficios tanto medioambientales como económicos. Una solución al problema de la falta de antecedentes es la adaptación de tecnologías existentes en tierra al ámbito naval tal como se realiza en este proyecto.

2. OBJETIVOS Y PROPÓSITOS

El objetivo de este proyecto es intentar solucionar algunos de los problemas comentados la introducción. El propósito fundamental del proyecto es el estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero aprovechando como biomasa los residuos orgánicos generados en los restaurantes y las aguas negras provenientes de los baños.

Para ello se calculará el espacio necesario para la instalación de una planta de metanización y así poder hacer una valoración tanto a nivel económico como medioambiental para decidir si vale la pena albergar una planta de estas características y tener que reducir el tamaño de algunos de los servicios lúdicos del crucero, como por ejemplo gigantescas piscinas, el planetario, el rocódromo, teatros de hasta 600 plazas, pistas de hielo, etc.

Para realizar el dimensionamiento de la instalación será necesario calcular la cantidad de residuos generados. Se calculará la cantidad de comida desperdiciada y la cantidad de sobras de comida de los restaurantes. Igualmente se calculará la cantidad de aguas negras generadas por cada persona y día.

También se calculará la cantidad máxima de biogás que puede llegar a generar una planta de estas dimensiones. Con este valor se determinará la cantidad de combustible que se podrá ahorrar ya que el buque generará parte de la energía necesaria a partir de los residuos en la planta de metanización.

De esta manera no solo se reducirá el consumo de combustibles tan contaminantes como el fuel-oil, sino que se utilizará una energía limpia que ayudará a que el buque contamine menos dándole publicidad al ser un buque involucrado en la prevención del medio ambiente. También se eliminarán gran parte de los residuos generados en el crucero eliminando de esta manera el coste de descarga de los mismos. Debido a la fermentación que sufrirán los residuos en la planta de metanización se eliminarán todos los malos olores que antes se producían. Incluso se puede llegar a vender la parte de residuo que no se fermenta como fertilizante o abono de alta calidad consiguiendo de esta manera un ingreso económico extra para la compañía del buque.

Al utilizar las aguas negras para generar energía ya no será necesario que el barco tenga una planta de tratamiento para estas, así que la planta de tratamiento será mucho más pequeña ya que solo tendrá que purificar las aguas grises.

3. EL BIOGÁS

Uno de los objetivos del proyecto es generar energía a partir de los residuos de un crucero. Los residuos de un crucero son fundamentalmente orgánicos, la biomasa, por lo que se puede generar energía a partir de ellos de diversas maneras.

Una manera es incinerarlos y generar calor para producir vapor de agua y mover una turbina para generar electricidad. Una instalación de este tipo es bastante simple y relativamente económica pero al quemar los residuos se emite a la atmosfera gran cantidad de gases contaminantes. Hay buques que hoy en día todavía operan con este tipo de plantas, pero es necesario que cada vez más se prescindan de ellas para dejar de destruir la capa de ozono y frenar el efecto invernadero debido a los gases que emiten.

Existen otros métodos de utilización de la biomasa para generar energía. Por ejemplo el biodiesel. El biodiesel es un combustible líquido ecológico que se obtiene a partir de lípidos naturales mediante la esterificación y transesterificación. Estos procesos químicos consisten fundamentalmente en combinar un aceite y un alcohol. Los aceites vegetales se obtienen a partir de los cultivos de palma, de algas y otros. Es un método muy interesante, ya que se produce biodiesel que puede sustituir sin problema al petrodiesel o gasóleo utilizado en algunos motores. El gran problema de esta técnica es que precisa de grandes cantidades de aceites vegetales y grasas animales, que no hay en el buque.

La solución encontrada es la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos del buque. El biogás es un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico dependiente del contenido de gas metano. El aprovechamiento del biogás es muy amplio, ya que puede ser utilizado en turbinas de gas, calderas y motores de combustión interna modificados y generar directamente energía mecánica para mover las hélices del buque por ejemplo o energía eléctrica a partir del accionamiento de un alternador.

La generación de biogás es a partir de la digestión anaeróbica o anaerobia de la biomasa dentro de un biodigestor. El proceso de generación del biogás y explicación de la instalación y sus componentes se describe más adelante.

El poder calorífico del biogás es de 4700 a 5500 kcal/m³ dependiendo del contenido de gas metano CH₄ y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.000 BTU/m³. Su temperatura de ignición es similar a la del metano puro y varía de 650 a 750°C. El biogás no se quema o explosiona con facilidad. No se puede quemar solo, sino que se necesita una mezcla homogénea de aire-biogás para que se encienda. No se puede encender con un fósforo una fuga de biogás que sale por un agujero de algún punto de la instalación, ya que el fósforo se apaga inmediatamente al entrar en contacto con el biogás por falta de una mezcla adecuada de oxígeno. Una fuga se vuelve explosiva cuando el biogás tiene tiempo suficiente para mezclarse con oxígeno y llegar a formar una mezcla con un contenido de aire de 6-12%.

Un m³ de biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para generar 2 kWh de electricidad, generar unas 20 horas de luz equivalente a una bombilla de 100 W o hacer funcionar un motor de 1CV durante 2 horas.

Todos estos valores dependen totalmente de que la composición del biogás sea la correcta. A continuación se muestran los porcentajes adecuados de los elementos presentes en el biogás.

Componentes	Contenido
Metano	50 – 60 %
Dióxido de Carbono	30 – 40 %
Hidrógeno	5 – 10 %
Nitrógeno	1 – 2 %
Oxígeno	0,1 %
Sulfuro de hidrógeno	0 – 1 %

Tabla 1 - Composición biogás

En la siguiente tabla se muestran algunas equivalencias energéticas para 1m³ de biogás.

Cantidad equivalente	Tipo de biomasa o sustrato	Capacidad energética
0,71 l	Fuel - Oil	12 kWh/l
0,8 l	Gasolina	16 kWh/l
0,7 kg	Carbón	8,5 kWh/kg
1,5 kg	Madera	4,5 kWh/kg
0,6 m ³	Gas natural	5,3 kWh/m ³
0,24 m ³	Gas propano	25 Wh/m ³

Tabla 2 - Equivalencias energéticas

3.1. Historia del biogás

La fermentación anaerobia o anaeróbica se ha utilizado desde hace varios siglos en Europa y Asia. Las primeras noticias de su existencia fueron llevadas a cabo por Volta en el año 1776. Volta descubrió la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas y relacionó la formación de biogás con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo.

La fórmula del gas metano CH₄ fue descubierta por Amedeo Avogadro en 1821. En el año 1868 el biólogo inglés Antonio Bechamp definió las reacciones de formación del biogás como constituyentes de un proceso microbiológico.

La primera planta de digestión anaerobia fue construida en una colonia de leprosos, en Bombay, India en 1859. Más tarde, en 1895, los digestores anaerobios llegaron a Inglaterra, cuando el biogás fue usado como combustible en las lámparas externas de las calles de Londres.

En 1884 el químico francés Pasteur realizó investigaciones del biogás producido a partir de residuos animales. Unos de sus alumnos llamado Gayon fermentó 1m³ de estiércol de ganado a 35 °C obteniendo unos 100 l de biogás. Este ensayo dio tan

buenos resultados que Pasteur sugirió que se podría utilizar como combustible para calefacciones y para el alumbrado público. Se obtuvieron resultados tan positivos que incluso se pensó en aprovechar el estiércol de los miles de caballos que en esa época servían como transporte público por las calles de París.

En el año 1906 se realizó la construcción de la primera planta de tratamiento en Alemania, y en el 1920 se construyó una planta depuradora de aguas residuales anaeróbica con producción de biogás que se inyectó a la red pública de gas natural.

Durante la Segunda Guerra Mundial muchos granjeros construyeron digestores para producir biogás con el fin de alimentar tractores y producir electricidad. Estas instalaciones cayeron en desuso a finales de los años 50 cuando se inició el boom petrolero.

Actualmente se ha reactivado el uso de los biodigestores, siendo Asia el continente que más instalaciones de biogás ha construido. En 1963 se creó la Oficina de Difusión del biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación en biogás para Asia y el Pacífico. En Europa existen más de 9000 instalaciones que producen biogás. Alemania, Holanda, Austria y Dinamarca son los países donde existen la mayoría de plantas de biogás. En España el desarrollo de proyectos de biogás es mínimo con respecto al resto de Europa, debido a la poca investigación que existe de esta tecnología.

3.2. Beneficios del biogás

El empleo energético de la biomasa presenta numerosas ventajas, tanto para el propietario de la instalación de aprovechamiento como para el conjunto de la sociedad.

En el primero de los casos, se obtendrían ventajas fundamentalmente económicas ya que se reducen los costos energéticos al disminuir la cantidad de combustibles o de energía eléctrica que se debe generar. En el segundo caso el uso de la biomasa presenta, al igual que ocurre con otras energías renovables, numerosas ventajas

medioambientales y socioeconómicas. Las aguas residuales, desperdicios, basuras y residuos orgánicos se convierten en uno de los desechos más contaminantes en nuestro medio y muchas técnicas modernas no logran solucionar económicamente este problema. Por lo tanto, la función de los biodigestores es descontaminar y transformar estos desechos y convertirlos en subproductos aprovechables como el bioabono y el biogás.

Los digestores cumplen la función ecológica de reciclar totalmente los desechos orgánicos a un costo muy bajo, consiguiendo también la protección del suelo (al producir abonos de gran calidad), la protección del agua (al evitar verter residuos orgánicos al mar) y la del aire y la atmosfera (al reducir las emisiones de CH_4 , reduciéndose así el efecto invernadero).

Por último, el empleo de la tecnología de digestión anaerobia para tratar biomasa residual húmeda, además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, en casi su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido.

3.2.1. Beneficios energéticos

- ❖ Proceso neto de producción de energía
- ❖ Generación de un combustible renovable de alta calidad

3.2.2. Beneficios medioambientales

Realizada en las condiciones adecuadas, la combustión de biogás produce agua y dióxido de carbono. La cantidad emitida de CO_2 (principal responsable del efecto invernadero) fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento.

Es decir, el CO_2 de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmosfera y la vegetación, por lo que no supone un incremento del gas invernadero en la atmosfera (siempre que la vegetación se renueve a la misma velocidad a que se

degrada). Además, no produce emisiones sulfuradas o nitrogenadas, ni partículas sólidas.

Por otra parte el uso de combustibles fósiles para obtener energía, sobre todo eléctrica, tiene como consecuencia el vertido de sustancias tóxicas al aire y al mar, dañando la naturaleza a corto, medio y largo plazo. Frente a esta situación y en un futuro no muy lejano, parece clara la necesidad de una transición en las fuentes de energía desde su actual dependencia de los hidrocarburos a nuevas energías renovables cada vez más ecológicas.

3.2.3. Beneficios económicos

- ❖ Producción de energía (electricidad y calor)
- ❖ Producción de bioabono de alta calidad (venta del producto)
- ❖ Ahorro del coste de descarga de los residuos del buque
- ❖ Beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía reduciendo costos de importación y de protección ambiental
- ❖ Mayor eficiencia en materia de costos que otras opciones de tratamiento desde la perspectiva del ciclo de vida y del rendimiento de utilidades
- ❖ El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética, uno de los objetivos marcados por los planes energéticos tanto a escala nacional como mundial, desplazamiento de energía eléctrica fósil por energías renovables

3.2.4. Beneficios socioeconómicos

Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles. Abre oportunidades de negocio y favorece la investigación y los desarrollos tecnológicos e incrementa la competitividad comercial de los productos.

- ❖ Evita la contaminación del medio ambiente
- ❖ Reducción significativa de las emisiones de dióxido de carbono y de metano
- ❖ Producción de abonos y fertilizantes ricos en nutrientes
- ❖ Maximización de los beneficios del reciclaje

3.3. La digestión anaerobia

El biogás se produce a través de la degradación anaeróbica de la biomasa. La digestión anaerobia es un proceso natural microbiano que ocurre de forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno. Genera una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) conocida como biogás y una suspensión acuosa (bioabono) que contiene los componentes no degradados o parcialmente degradados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa.

Esta reacción se genera dentro de unos depósitos o tanques cerrados herméticamente llamados biodigestores. A grandes rasgos se pueden definir como recipientes y tanques que permitan la carga (afluente) de sustratos (biomasa) y descarga (efluente) de bioabono-biol y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético. En este proyecto el término biomasa o sustrato se refiere a toda la materia orgánica que proviene de los desechos de las cocinas, comida desperdiciada y aguas negras.

3.3.1. Características del proceso

El proceso de digestión se puede comparar con el proceso que ocurre en el interior de los estómagos de los rumiantes. La digestión anaeróbica es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico; está enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono, siendo posible transformar la biomasa en ausencia de oxígeno en compuestos volátiles.

Cuando se acumula materia orgánica (compuesta por polímeros, como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc.) en un ambiente acuoso, los microorganismos aerobios, actúan primero, tratando de alimentarse de este sustrato. Este proceso consume el oxígeno disuelto que pueda existir. Después de esta etapa inicial, cuando el oxígeno se agota, aparecen las condiciones necesarias para que la flora anaerobia se pueda desarrollar consumiendo también, la materia orgánica disponible. Como consecuencia del proceso respiratorio de las bacterias se genera una importante cantidad de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y ácido sulfhídrico (H_2S).

Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido, en la práctica existe todavía información muy limitada sobre los procesos químicos que la ocasiona y su microbiología bacteriana. Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaerobia se desarrolla en cuatro etapas durante las cuales la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para la obtención de biogás y bioabono, como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias.

1ª ETAPA: Hidrólisis – En esta etapa la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos, de manera que se descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios. La materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas que hidrolizan* grasas, proteínas y carbohidratos transformando estas moléculas complejas en polímeros más simples. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros. Durante la hidrólisis ya hay producción de CO_2 .

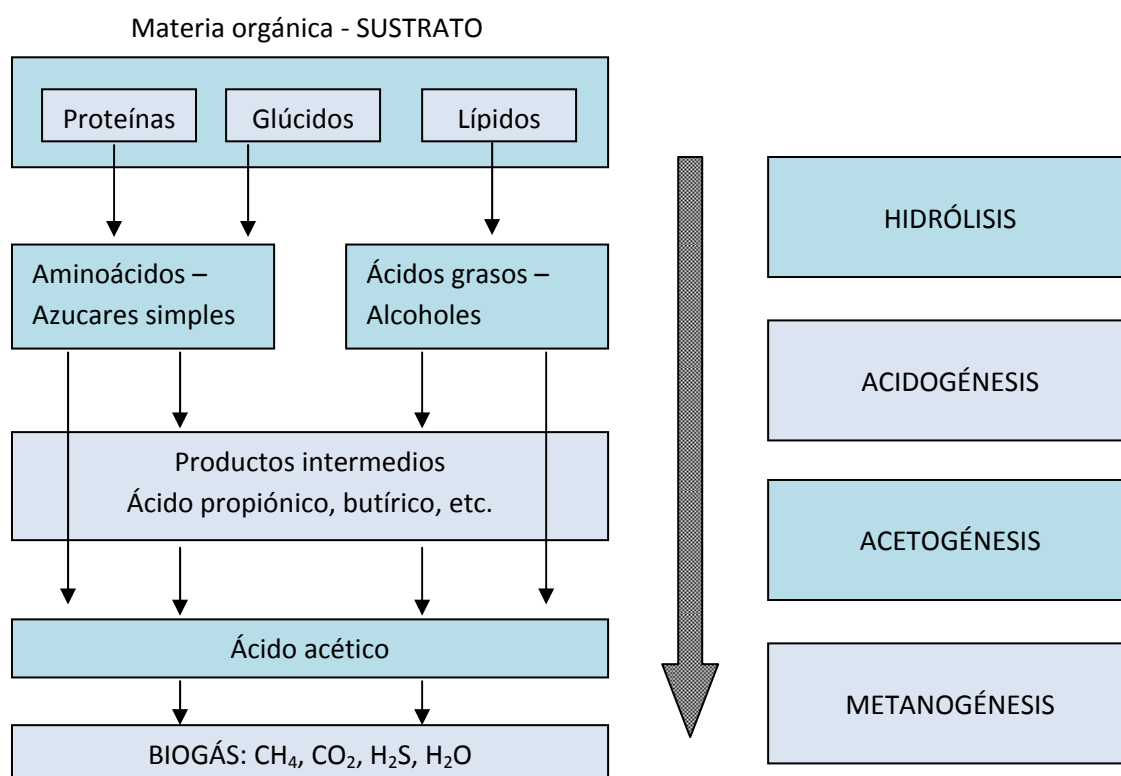
2ª ETAPA: Acidogénesis – En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases las llevan a cabo un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas, que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos grasos volátiles. Son bacterias anaerobias facultativas (pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia

de oxígeno molecular, el oxígeno resulta tóxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa del DQO (Demanda Química de Oxígeno) del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente.

3ª ETAPA: Acetogénesis – Esta etapa la llevan a cabo las bacteria acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos produciendo ácido acético y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es endotérmica ya que necesita energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacteria acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

4ª ETAPA: Metanogénesis – En esta fase un segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase de acetogénesis, por ello, son las que limitarán el proceso de degradación anaerobia. Son también las que condicionarán el tiempo de retención de la biomasa en el digestor así como la temperatura del proceso.



Esquema 1 - Formación del biogás

3.3.2. Parámetros importantes

La actividad metabólica involucrada en el proceso de producción de gas metano se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso responde de forma diferente a la influencia de estos factores, no es posible dar valores cualitativos sobre el grado en que afecta cada uno de ellos a la producción de gas de forma precisa. Entre los factores más importantes que influyen en la producción de biogás están a los siguientes:

3.3.2.1. Ausencia de oxígeno

Las bacterias metanogénicas son seres vivos que solo pueden existir en ambientes anóxicos, en ausencia de oxígeno. La razón por la cual las bacterias metanogénicas no se mueren o se inhiben inmediatamente en presencia de oxígeno es porque viven en conjunto con otras bacterias que sí pueden

sobrevivir en estos ambientes. Estas son las bacterias facultativas que pueden vivir en presencia de oxígeno y en ausencia de él. Es por esta razón que para que ocurra un proceso anaeróbico óptimo deben crearse las condiciones para la formación de un medio que no contenga más de un 3-5% de oxígeno en el interior del digestor. Si se sobrepasa este valor podría inhibirse el proceso digestivo.

3.3.2.2. Masa seca (MS)

La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene la biomasa. Este valor se define también como la materia seca total con la que se alimenta diariamente al digestor. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir en el digestor debe ser del 10-15%. Se logra esta dilución mezclando la biomasa con agua o recirculando el biol. Esta dilución es importante para establecer un mejor contacto de las bacterias con el sustrato. Mezclas de biomasa con porcentajes de masa seca mayor de 15% son difíciles de bombear por las tuberías de alimentación al digestor. También son muy difíciles de agitar en el digestor o se requiere grandes cantidades de energía para la agitación.

3.3.2.3. Masa volátil (MV)

La masa volátil o sólidos volátiles es el volumen de masa orgánica que contiene la biomasa. Se determina la masa volátil estimando el contenido de cenizas que se obtiene de una muestra de masa seca después de la incineración de esta durante 6 horas a 550 °C.

El conocimiento de la MV es importante ya que solo este porcentaje es el contenido real de masa orgánica en la biomasa. El resto es humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no producen biogás. Únicamente este contenido de MV es el que produce el biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor.

3.3.2.4. Carga orgánica volumétrica (COV)

Se entiende como COV la cantidad de materia orgánica volátil (MV) con la que se alimenta diariamente al biodigestor por m³ de volumen de digestor. Se define en Kg de MV por m³ de volumen de digestor (Kg MV/m³). El valor de la COV depende mayormente de la temperatura del proceso en el interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). La COV es considerada como un parámetro para controlar la carga del digestor y es un factor determinante para el dimensionamiento de este. Si el sustrato está muy diluido la bacterias no tienen suficiente alimento para vivir, mientras que un exceso de sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso, ya que les impide acceder al alimento.

A mayor temperatura y mayor TRH, mayor puede ser la COV y por lo tanto con más masa orgánica puede ser alimentado el digestor. Pero a mayor COV mayor es el riesgo de inhibir el proceso, ya que se carga demasiada biomasa a las bacterias. En este caso el proceso se vuelve muy inestable y tiene que ser observado y analizado con más frecuencia. Generalmente la COV debe alcanzar valores entre 2-3 Kg MV/m³ de digestor por día.

3.3.2.5. Temperatura

Existen tres rangos de temperatura para la digestión anaeróbica. Un rango psicrófilico (por debajo de 25°C), uno mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro termófilico (entre 45 y 60°C). La velocidad de degradación de la biomasa a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales especialmente a una disminución repentina de sólo unos pocos grados.

Temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos, y por lo tanto mayores volúmenes de digestor.

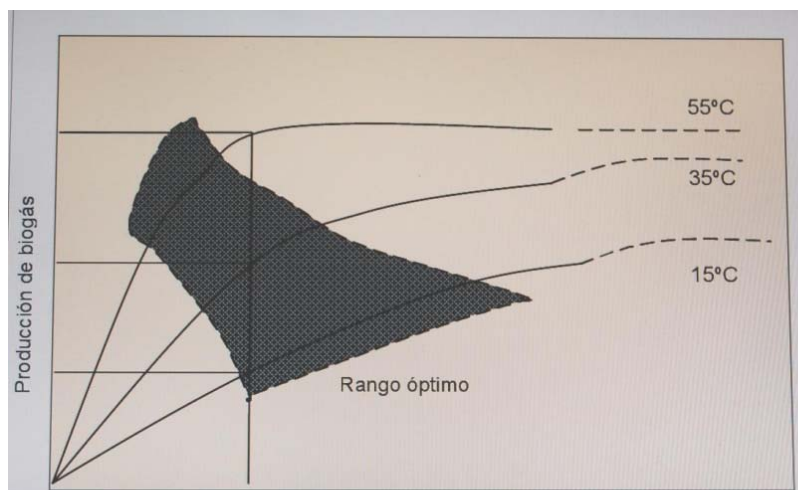
Generalmente el régimen termófilico se ha relacionado con mayores problemas de estabilidad. Sin embargo se ha encontrado información donde se afirma que las plantas termofílicas son tan estables y tan operables como las mesofílicas,

presentando, además de las ventajas antes mencionadas, una mayor producción de biogás por unidad de sólidos volátiles y una mejora en el postratamiento, ya que el efluente de la digestión termofílica es más fácilmente deshidratable, junto con una menor producción de malos olores.

El tratamiento termofílico presenta la importante ventaja de la mayor eliminación de organismos patógenos, que puede ser un factor clave en función del destino final de efluente, sobre todo para su uso como fertilizante orgánico como es el caso de este proyecto.

Cuando se aprovechan desechos de restaurantes, mercados, etc. se debe higienizar la biomasa antes de su alimentación al digestor. A través de la higienización se eliminan bacterias, parásitos y virus y así se reduce el riesgo de contaminación y transmisión de enfermedades. La higienización se realiza calentando la biomasa a una temperatura de 70°C durante una hora. Además después de este proceso, y previo a la alimentación de la biomasa en el digestor, hay que reducir o igualar la temperatura de la biomasa a la temperatura del digestor. Un tratamiento termofílico por encima de 50°C reúne en un solo paso el tratamiento de higienización y el de digestión anaerobia reduciendo costes de construcción, costes de mantenimiento, espacio utilizado y disminuyendo posibles puntos de fallo.

Todas estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de biogás, paralelamente aumentarán los costes de instalación, operación y mantenimiento y la complejidad de la misma.



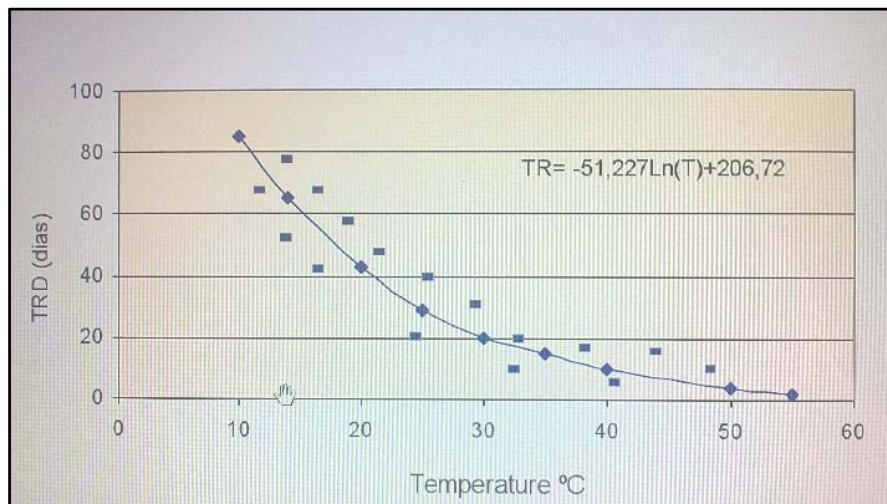
Gráfica 1 - Producción de biogás/Temperatura

Para la instalación de este proyecto se ha considerado que el régimen a utilizar será un régimen termofílico, ya que la temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (TRH). A medida que aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de digestor para digerir una misma cantidad de biomasa. Como el objetivo del proyecto es utilizar el mínimo espacio posible, un régimen termofílico ayudará a cumplirlo.

3.3.2.6. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

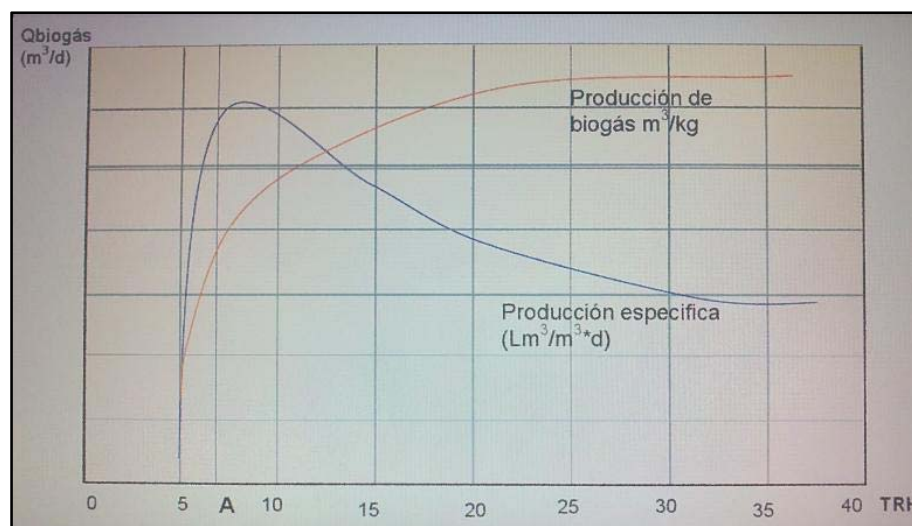
El TRH es el tiempo de permanencia de la biomasa del digestor. No existe un criterio unificado para determinar el tiempo de retención. Este valor depende de la temperatura ambiental y de la carga orgánica del digestor (COV). Estos dos valores determinan el volumen del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, de los cuales se hablará más adelante, el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. Como ya se ha comentado anteriormente, la selección de una mayor temperatura de proceso implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los

volúmenes del digestor necesarios para digerir un determinado volumen de biomasa.



Gráfica 2 - TRH/Temperatura

En la figura siguiente se muestra la influencia del TRH en la producción de biogás. Observando la figura se puede deducir que con el aumento de la carga de biomasa al digestor (eje de ordenadas Q) y reducción del TRH (eje de abscisas) aumenta la productividad de las bacterias (producción específica), pero por el aumento de la carga volumétrica Q, disminuye la producción de biogás. La tasa de producción de biogás aumenta proporcional a mayor carga del digestor hasta alcanzar un punto máximo (A). Por causa de la creciente carga de biomasa por unidad de tiempo, no se puede degradar la materia y decae la producción de biogás. Si se sigue acortando el TRH se disminuye rápidamente la producción de biogás, ya que debido al corto TRH se descarga materia orgánica sin que esta se haya degradado al interior del digestor.



Gráfica 3 - Producción biogás/TRH

Por estas razones hay que tener muy en cuenta durante la puesta en marcha y operación de los digestores, que la alimentación con biomasa vaya aumentando paulatinamente y no se exceda los volúmenes máximos de biomasa que se puede alimentar al digestor. En la práctica nunca se alcanza una máxima producción de biogás, el proceso se mueve cerca a la derecha del punto A.

3.3.2.7. Acidez y Alcalinidad

Es uno de los parámetros de control más importantes en la operación de los biodigestores, debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las variaciones del mismo. Si el valor del pH se mantiene entre 6,5 y 7,5 se consigue un buen rendimiento de degradación y una elevada concentración de metano. La digestión comienza a inhibirse a un pH menor que 6,5. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y entre ellos el acético, tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH de digestor.

Comúnmente la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 – 3 g/l, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará

en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen.

Para lograr un adecuado funcionamiento de los sistemas anaerobios es indispensable generar las condiciones ambientales favorables para el desarrollo y crecimiento de las bacterias metanogénicas y de esta manera lograr las eficiencias de producción de biogás estimadas para cada proyecto.

Se pueden utilizar varios productos para el control del pH que se diferencian en dos grupos:

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente como el hidróxido de sodio (NaOH), el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) o el bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3).
- Los que reaccionan con gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática como la cal viva (CaO), la cal hidratada (Ca(OH)_2) o el amoníaco (NH_3).

La cal es aplicada usualmente para reducir el pH por ser más barata y común, pero por ser un compuesto o producto bastante insoluble puede ocasionar serios problemas operacionales al digestor.

El bicarbonato de sodio es bastante fácil de manipular y es bastante soluble al contrario de la cal, no requiere gas carbónico pero su costo operativo es más elevado.

La capacidad de amortiguamiento del pH se mide de la siguiente manera. Se toma una muestra de 100 ml de sustrato del interior del digestor y se mide el valor del pH. Cuando la medición se mantiene estable en el mismo valor se agrega ácido clorhídrico (HCl) de concentración 0,1 mol/l. Primero se adiciona hasta llegar a un pH de 5. La cantidad de HCl adicionado hasta alcanzar el pH=5 es la medida para determinar la capacidad de amortiguamiento del sustrato. Después se adiciona otra vez HCl hasta que el pH baja a 4,3. Este valor es una medida para la determinación de los ácidos orgánicos volátiles. Cuando llega a un pH=4,3 se llega a un punto en el cual se conoce que el sustrato ya no

contiene carbonatos, es decir, el sustrato ya no tiene capacidad buffer alcalina. La cantidad de HCL que debe adicionarse para alcanzar este valor de pH es una medida de la capacidad buffer alcalina. Como parámetro de medición se entiende la relación de la cantidad de ácido consumido para alcanzar un pH de 5 a 4,3 sobre la cantidad de ácido para alcanzar al comienzo un valor de pH=5. Esta relación de ser menor a 0,3. Si esta relación es mayor se determina que el proceso está sobrecargado o inestable.

3.3.2.8. Agitación

La agitación de los digestores anaerobios tiene diversos objetivos, que se resumen en los siguientes puntos. Poner en contacto el sustrato fresco o afluente con la población bacteriana, y eliminar los metabolitos producidos por los metanogénicos al favorecer la salida de los gases; proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana; prevenir la formación de capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el digestor; prevenir la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del digestor, y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema; eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el digestor. En resumen los agitadores son necesarios debido a las siguientes razones:

- Mezcla de la biomasa fresca con la biomasa digerida existente en el interior del digestor
- Mejor distribución y mezcla de nutrientes y calor dentro del digestor
- Reducción de la formación de costras y flóculos de biomasa que pueden depositarse en el fondo del digestor
- Mejor y facilitar la extracción de biogás (se sueltan las burbujas de biogás)

Para la elección de un determinado sistema de agitación se tendrán siempre presente los objetivos mencionados. Hay que tener en cuenta que una agitación excesiva puede causar problemas y que se debe buscar un punto medio óptimo. Para digestores de gran tamaño como en el caso de este proyecto se suelen utilizar sofisticados equipos con agitadores de hélice y recirculadores de sustrato.

3.3.2.9. Factores que inhiben la producción de biogás

Si cae la producción de biogás o se inhibe el proceso puede deberse a varias razones. Por un lado pueden ser razones operativas o de mantenimiento o por otro lado pueden haber intervenido elementos inhibidores. Estos son elementos que en cantidades muy pequeñas actúan negativamente en la producción de biogás o en la estabilidad de los procesos anaeróbicos. Pueden ser elementos que ingresan al digestor por medio de la biomasa o elementos que se desarrollan como parte del proceso anaeróbico.

Durante el proceso de producción de biogás se puede formar amoníaco NH_3 que actúa como elemento inhibidor si existe en bajas concentraciones en el interior del digestor. Este elemento debe estar en equilibrio con el contenido de amonio NH_4^+ . El amonio reacciona con agua y se transforma en amoníaco. Esto significa que si la biomasa se vuelve alcalina se rompe el equilibrio de estos elementos y empieza a subir la concentración de amoníaco. Mientras el amonio sirve a las bacterias como fuente de nitrógeno, actúa el amoníaco ya en pequeñas concentraciones, mayores a 0,15 g/l como elemento inhibidor. Aparte, la suma de concentraciones de NH_3 y NH_4^+ que sean mayores a 3000 mg/l hará que estos actúen como inhibidores del proceso.

Otro elemento que se puede formar durante el proceso anaeróbico es el H_2S . Este elemento puede actuar como inhibidor del proceso en concentraciones mayores a 500 mg/l.

Por estas razones es importante realizar comprobaciones periódicas del estado de la biomasa del interior del digestor. A través de uno de los desagües del digestor se puede extraer una muestra para examinarla y asegurar que el proceso cumple con los valores máximos de concentración de elementos inhibidores. A continuación se presenta una tabla con las concentraciones máximas y mínimas de elementos necesarias para la metanogénesis. Si estos valores no se cumplen puede inhibirse el proceso y dejar de generar biogás.

Elemento	Valor
pH	6,5 – 8.0
Contenido en sales	2,5 – 25 mS/cm
Oxígeno	< 1ppm
Hidrógeno	6 Pa
Carbono total	0,2 – 50 g/l DQO
Magnesio	10 – 40 ppm
Azufre	50 – 100 ppm
Hierro	10 – 200 ppm
Níquel	0,5 – 30 ppm
Cobalto	0,5 – 20 ppm
Molibdeno	0,1 – 0,35 ppm
Cinc	0 – 3 ppm
Fosfatos	50 – 150 ppm
Relación C : N : P : S	2000 : 15 : 5 : 3

Tabla 3 - Factores inhibidores

4. BIOMASA UTILIZADA Y PRODUCCIÓN DE BIOGAS

Cualquier tipo de partícula orgánica podría ser utilizada para generar biogás, y en un crucero se pueden controlar grandes masas de residuos orgánicos. La biomasa que se utilizará para generar biogás son las aguas negras del buque, la comida desperdiciada (comida cocinada que no se llega a comer) y residuos de cocinas (todos los sobrantes de los alimentos utilizados para los platos). Existen otros residuos en el buque que se podrían emplear para generar energía, pero la baja cantidad de estos y la dificultad de reunirlos hace que no sea rentable utilizarlos.

Este proyecto se puede adaptar a cualquier tipo de crucero y tamaño posible, pero se ha escogido como buque de referencia el de mayor tamaño que existe actualmente, el Oasis of the Seas de la empresa naviera Royal Caribbean International. Esta decisión está basada en la idea que cuantos más pasajeros mayor cantidad de residuos se generarán y mayor espacio tendrá el crucero para albergar una instalación de estas dimensiones. El Oasis of the Seas tiene una eslora de 360 m, una manga de 47 m y una obra muerta de 72 m.



Ilustración 1 - Oasis of the Seas

La capacidad máxima de este crucero es de 6296 pasajeros y la capacidad mínima o de baja ocupación de 5400. Para cubrir todos los espectáculos, comedores, sala de máquinas, puente, marinería, etc. precisa de una tripulación de 2165 personas. El resultado es:

- Capacidad máxima = 8461 personas
- Capacidad mínima = 7565 personas

Para realizar los cálculos se han escogido los valores de porcentaje de Masa Seca, Masa Volátil, Degradación y producción de biogás capaces de generar el mayor volumen de biogás posible. De esta manera se parte de una situación ideal a la que se puede asignar un rendimiento de la instalación y calcular los valores exactos de producción de biogás. Para conocer el valor del rendimiento de la instalación es necesario realizar una serie de pruebas previas a la construcción de la planta, y así comprobar que cumple con las expectativas. Estas pruebas consisten en fabricar un digestor a escala parecido al que se utilizará en la instalación y observar si la producción de biogás es la esperada. También se utilizan simuladores y software especializado para el cálculo de los rendimientos.

4.1. Aguas negras

4.1.1. Cantidad de biomasa

En un crucero de estas características se generan una gran cantidad de residuos sólidos procedentes de los sanitarios. Para realizar el cálculo aproximado de la cantidad de deposiciones humanas que se generan diariamente, se han utilizado los valores procedentes de un estudio realizado por los “Laboratorios Normon S.A.”. Según su investigación una persona sana genera entre 50 y 100 gramos de sólidos diarios siguiendo una dieta cárnica, entre 250 y 400 gramos siguiendo una dieta vegetariana y entre 100 y 200 gramos siguiendo una dieta mixta. Para este proyecto se ha considerado que la mayoría de las personas siguen una dieta mixta y que al realizar todas las comidas del día (desayuno, comida y cena) en restaurantes del barco se come

más de lo habitual y se generan más residuos de lo normal. Por esta razón se ha cogido como valor de referencia los 200 gramos de sólidos diarios.

Por lo tanto se genera la cantidad de aguas negras siguiente:

- Cantidad máxima de aguas negras

$$200 \text{ g/persona y día} \times 8461 \text{ personas} = \mathbf{1,69 \text{ toneladas}}$$
 de aguas negras al día

- Cantidad mínima de aguas negras

$$200 \text{ g/persona y día} \times 7565 \text{ personas} = \mathbf{1,51 \text{ toneladas}}$$
 de aguas negras al día

4.1.2. Características de la biomasa

Una vez conocida la cantidad de aguas negras que se generan es necesario saber qué parte de todo este residuo se utilizará para la producción de biogás. Hay que tener en cuenta el porcentaje de masa seca, ya que cualquier líquido que contenga el residuo no producirá biogás. En el caso de excrementos humanos cerca del 76% del residuo es agua, y solo es aprovechable el 24% de toda la biomasa. También se debe controlar la masa volátil, que es el porcentaje de materia orgánica que contiene la biomasa y la que realmente generará el biogás. Las heces humanas contienen un 80-95% de materia orgánica. Finalmente es necesario conocer el porcentaje de degradación. Este indica el porcentaje de la masa orgánica que se degrada durante el tiempo de retención y se transforma en biogás. La degradación total de la biomasa orgánica hasta su mineralización solo sería posible si la biomasa no tuviera lignina, que es un polímero presente en las paredes celulares de ciertos organismos. El porcentaje de degradación que se alcanza en un biodigestor depende también del tipo de biomasa, del tipo de persona y de su alimentación. En la práctica se logra un porcentaje de degradación del 35 al 75%.

Una vez conocido el valor aproximado de biomasa que sí producirá biogás, se calculan los metros cúbicos de biogás que se producirán por tonelada de materia volátil que se

degradará. Este valor es la producción específica de biogás y dependiendo de la composición de la biomasa y de su procedencia este valor será más grande o más pequeño.

En el caso de las aguas negras los valores de estos parámetros son los siguientes:

$$\% \text{ Masa Seca} = 5\% - 24\%$$

$$\% \text{ Masa Volátil} = 80\% - 95\%$$

$$\text{Porcentaje de degradación} = 60\% - 72\%$$

$$\text{Producción específica de biogás} = 900 - 1200 \text{ m}^3/\text{t MV}$$

4.1.3. Cantidad de biogás producido

Para este proyecto se ha considerado que la calidad y proceso de degradación de la biomasa es óptimo y por lo tanto se ha calculado la cantidad máxima de biogás que se puede llegar a producir. Teniendo en cuenta estos porcentajes los cálculos a realizar son los siguientes:

Máxima ocupación (8461 personas)

La cantidad de aguas negras diarias es de 1,69 toneladas. De este total solo es parte fecal o parte sólida un 24%, por lo tanto:

$$1,69 \cdot \frac{24}{100} = 0,406 \text{ t} = 406 \text{ Kg}$$

A este valor hay que restarle el 5% de humedad, trazas inorgánicas, etc.

$$0,406 \cdot \frac{95}{100} = 0,386 \text{ t} = 386 \text{ Kg}$$

Ahora se calcula la parte que llegará a degradarse, teniendo en cuenta que nunca llegará a degradarse un 28%.

$$0,386 \cdot \frac{72}{100} = 0,278 \text{ t} = 278 \text{ Kg}$$

Este resultado es la cantidad de biomasa que producirá biogás. Si lo multiplicamos por la producción específica de biogás por tonelada de materia seca degradada obtenemos el siguiente valor:

$$0,278 \text{ t} \cdot 1200 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = 333,35 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}$$

Es la cantidad máxima de biogás que se puede llegar a generar a partir de las aguas negras del buque ya que se tiene en cuenta los porcentajes más altos y el máximo número de pasajeros.

Mínima ocupación (7565 personas)

Los cálculos a realizar son los mismos. Únicamente varía la cantidad de aguas negras generada (1,51 t).

- Masa seca

$$1,51 \cdot \frac{24}{100} = 0,363 \text{ t} = 363 \text{ Kg}$$

- Masa volátil

$$0,363 \cdot \frac{95}{100} = 0,345 \text{ t} = 345 \text{ Kg}$$

- Porcentaje de biomasa que se degrada

$$0,345 \cdot \frac{72}{100} = 0,248 \text{ t} = 248 \text{ Kg}$$

- Producción específica de biogás

$$0,248 \text{ t} \cdot 1200 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = \mathbf{298,05 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}}$$

4.2. Comida desperdiciada

4.2.1. Cantidad de biomasa

Un crucero de este calibre puede llegar a tener hasta 10 restaurantes para poder alimentar a todas las personas que viajen en él. Esto supone grandes cantidades de alimentos para elaborar todos los platos que se servirán a los comensales. Generalmente, cuando se va a un restaurante se come más de lo habitual y muchas veces la gente no puede terminarse los platos o simplemente no son de su agrado y no se lo comen. Si tenemos en cuenta que en un crucero se desayuna, come y cena en restaurante la cantidad de comida que se desperdicia es elevada.

Según un estudio encargado por la ONU, los países desarrollados tiran de media anual entre 95 y 115 Kg per cápita. Realizando un simple cálculo:

$$115 \frac{\text{Kg}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} = \mathbf{315 \text{ g}}$$

Se tiran alrededor de 315 gramos diarios por persona. Son valores referidos a familias de un nivel social medio y que realizan la gran parte de las comidas en casa. Cuando se cocina en casa y sobra comida se puede guardar en el frigorífico, pero no pasa lo mismo en los restaurantes. Cuando un plato sale al comedor no puede ser reutilizado, sus dos únicos caminos son: el estómago de un pasajero o la basura. Lo que suele sobrar cuando se come en restaurante es:

- el pan de acompañamiento
- las guarniciones (patatas fritas, verduras, ensaladas, etc.)
- parte de postres (pasteles, frutas, etc.)
- bollería de los desayunos (por estar reseca)
- desayunos de buffet que no se pueden guardar (huevos fritos, bacón, etc.)
- etc.

Hay que tener en cuenta que se trata de un crucero de lujo y que no se pueden servir platos de presentación o estado mediocre. Cualquier alimento que no pase el filtro de calidad también terminará en la basura.

Por estas razones se ha considerado que los 315 g podrían llegar a ser unos 400 g/persona y día que corresponde a un aumento del 27% de comida desperdiciada respecto al valor del estudio encargado por la ONU. De esta manera el resultado final de comida diaria desperdiciada per cápita en el crucero es de:

$$315 \text{ g} \cdot \frac{127}{100} = 400 \text{ g}$$

Una vez conocido el valor de comida desperdiciada por persona diariamente se puede calcular el total de comida desperdiciada:

- o Cantidad máxima de comida desperdiciada

400 g/persona y día x 8461 personas = **3,38 toneladas** de comida desperdiciada al día

- Cantidad mínima comida desperdiciada

400 g/persona y día x 7565 personas = **3,03 toneladas** de comida desperdiciada al día

4.2.2. Características de la biomasa

Como cualquier otro producto, parte de esta comida es agua y no todo es parte orgánica. Hay que conocer los parámetros de Masa Seca, Masa Volátil y porcentaje de degradación para saber qué cantidad del total puede llegar a generar biogás. Los parámetros son los siguientes:

$$\% \text{ Masa Seca} = 40\% - 75\%$$

$$\% \text{ Masa Volátil} = 80\% - 90\%$$

$$\text{Porcentaje de degradación} = 58\% - 65\%$$

$$\text{Producción específica de biogás} = 150 - 600 \text{ m}^3/\text{t MV}$$

Se puede observar que la cantidad de materia seca de la comida desperdiciada es mucho mayor que la de las aguas negras, pero el porcentaje de degradación no es tan alto debido a la composición del producto. Además la producción específica de biogás por tonelada de materia volátil se reduce a la mitad, es decir, se generará menos biogás con la misma cantidad de masa volátil.

4.2.3. Cantidad de biogás producido

Los cálculos para conocer la producción de biogás son los siguientes:

Máxima ocupación (8461 personas)

- Masa seca

$$3,38 \cdot \frac{75}{100} = 2,538 \text{ t} = 2538 \text{ Kg}$$

- Masa volátil

$$2,538 \cdot \frac{90}{100} = 2,284 \text{ t} = 2284 \text{ Kg}$$

- Porcentaje de biomasa que se degrada

$$2,284 \cdot \frac{65}{100} = 1,485 \text{ t} = 1485 \text{ Kg}$$

- Producción específica de biogás

$$1,485 \text{ t} \cdot 600 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = \mathbf{890,943 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}}$$

Mínima ocupación (7565 personas)

- Masa seca

$$3,03 \cdot \frac{75}{100} = 2,272 \text{ t} = 2272 \text{ Kg}$$

- Masa volátil

$$2,272 \cdot \frac{90}{100} = 2,045 \text{ t} = 2045 \text{ Kg}$$

- Porcentaje de biomasa que se degrada

$$2,045 \cdot \frac{65}{100} = 1,329 \text{ t} = 1329 \text{ Kg}$$

- Producción específica de biogás

$$1,329 \text{ t} \cdot 600 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = \mathbf{797,647 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}}$$

4.3. Desechos de cocinas

4.3.1. Cantidad de biomasa

Se pueden considerar como desechos de cocinas aquellos residuos orgánicos procedentes de los alimentos utilizados para elaborar los platos. Los desechos de cocinas suelen ser:

- peladuras de frutas
- peladuras de algunas verduras
- partes de hortalizas que no se utilizan (hojas exteriores, etc)
- comida en malas condiciones
- etc.

Es muy difícil encontrar un valor medio de desechos de cocinas por persona y día ya que el peso del residuo puede variar según cuál sea el alimento del que proviene. Por ejemplo, no se puede calcular una pieza de fruta por comensal porque no pesa lo mismo la peladura de una manzana que la de una naranja, y nada que ver con la piel de un melón o sandía. Por eso se ha tomado como valor de referencia por persona y día el peso de la peladura de una manzana (≈ 50 g), el de una naranja (≈ 60 g) y una parte de sobras de verduras. Estos valores pueden variar en función de los platos, pero naranjas para zumos y verduras para acompañamientos siempre los hay en los menús. Se tomará el valor medio por persona y día de unos 125 gramos.

4.3.2. Características de la biomasa

El porcentaje de agua de este tipo de residuo será mayor que el de la comida ya preparada al ser sobretudo productos vegetales, y el porcentaje de degradación será inferior que el de la comida desperdiciada y las aguas negras.

$$\% \text{ Masa Seca} = 9\% - 37\%$$

$$\% \text{ Masa Volátil} = 80\% - 98\%$$

$$\text{Porcentaje de degradación} = 45\% - 61\%$$

$$\text{Producción específica de biogás} = 200 - 500 \text{ m}^3/\text{t MV}$$

Si cada persona genera 125 gramos al día, en total se generarán en todo el crucero:

- Cantidad máxima de residuos de cocinas

125 g/persona y día x 8461 personas = **1,06 toneladas** de comida desperdiciada al día

- Cantidad mínima de residuos de cocinas

125 g/persona y día x 7565 personas = **0,95 toneladas** de comida desperdiciada al día

4.3.3. Cantidad de biogás producido

Los cálculos para conocer la producción de biogás son los siguientes:

Máxima ocupación (8461 personas)

- Masa seca

$$1,06 \cdot \frac{37}{100} = 0,391 \text{ t} = 391 \text{ Kg}$$

- Masa volátil

$$0,391 \cdot \frac{98}{100} = 0,383 \text{ t} = 383 \text{ Kg}$$

- Porcentaje de biomasa que se degrada

$$0,383 \cdot \frac{61}{100} = 0,234 \text{ t} = 234 \text{ Kg}$$

- Producción específica de biogás

$$0,234 \text{ t} \cdot 500 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = \mathbf{116,966 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}}$$

Mínima ocupación (7565 personas)

- Masa seca

$$0,95 \cdot \frac{37}{100} = 0,350 \text{ t} = 350 \text{ Kg}$$

- Masa volátil

$$0,350 \cdot \frac{98}{100} = 0,343 \text{ t} = 343 \text{ Kg}$$

- Porcentaje de biomasa que se degrada

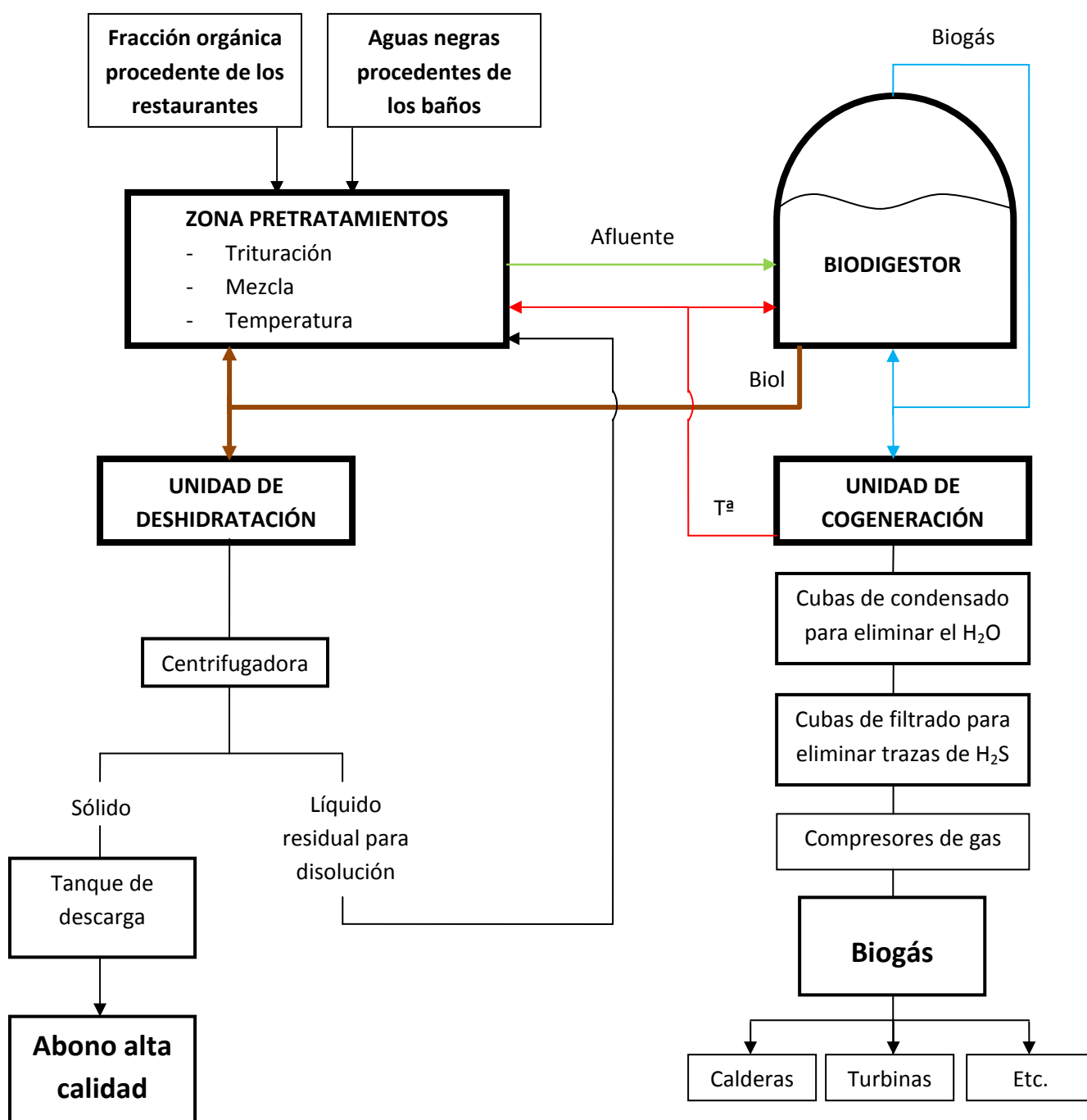
$$0,343 \cdot \frac{61}{100} = 0,209 \text{ t} = 209 \text{ Kg}$$

- Producción específica de biogás

$$0,209 \text{ t} \cdot 500 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t de MV}} = \mathbf{104,580 \text{ m}^3 \text{ de biogás al día}}$$

5. DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

Para conocer la viabilidad de este proyecto es necesario realizar los cálculos pertinentes para deducir aproximadamente el volumen de ocupación de la instalación. Una vez conocido éste resultado hay que valorar si es rentable utilizar el espacio para la producción de biogás y las ventajas que supone. La planta de metanización que se utilizará en el buque tiene los siguientes elementos:



Esquema 2 - Planta metanización

La planta de biogás se compone básicamente de una zona de pretratamientos donde se mezcla y homogeniza la biomasa, un sistema de alimentación, un sistema de agitación, un biodigestor donde se realiza la fermentación anaerobia, un sistema de captación de biogás, de control de proceso y de descarga de efluentes y lodos.

Para que esta planta funcione se ha supuesto que los inodoros del buque funcionan por vacío, es decir, que al apretar el botón de retirada de sólidos, no se utilizará agua para hacerlo, sino que un sistema de vacío succionará los residuos. También se ha supuesto que hay un botón de retirada exclusivo para las aguas negras y que las aguas grises de los inodoros tienen su propio sistema que termina en la planta de tratamiento de aguas del buque. Se ha considerado una situación ideal, donde los pasajeros tiraran cualquier resto sólido que no sean aguas negras (toallitas para bebés, preservativos, compresas, tampones, etc.) a la papelera.

Para el cálculo de los espacios necesarios para cada zona de la instalación es necesario utilizar los valores anteriormente obtenidos de la cantidad de biomasa y su correspondiente masa seca y masa volátil.

	Cantidad (Q)	%MS	MS	%MV	MV
Aguas negras	1,69	24	0,406	95	0,386
Comida desperdiciada	3,38	75	2,538	90	2,284
Desechos cocina	1,06	37	0,391	98	0,383
TOTAL	6,13 t		3,335 t		3,053 t

Tabla 4 - Biomasa/MS/MV

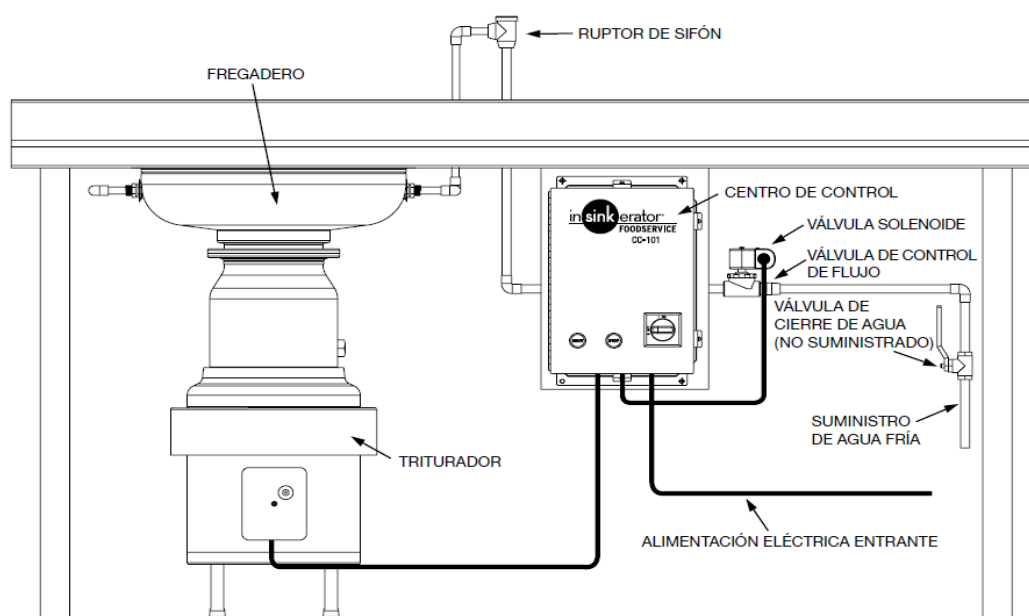
5.1. Zona pretratamientos

Antes de introducir la biomasa en el digestor es necesario realizar una serie de pretratamientos para poder adecuar la biomasa a las condiciones necesarias para generar la máxima cantidad de biogás. Hay que triturar la biomasa, mezclarla con agua y finalmente calentarla a la temperatura del digestor.

5.1.1. Trituración

La comida que llega de las cocinas puede contener partículas sólidas demasiado grandes para que se puedan degradar fácilmente. Es necesario triturar estos residuos para que la fermentación en el digestor sea mucho más rápida. En caso contrario se necesitarían largos períodos de tiempo para poder extraer todo el metano posible.

Para solucionar este problema hay que instalar trituradores de comida en todas las cocinas. De esta manera la comida que llega al tanque de alimentación ya está desmenuzada y contiene parte del agua que se necesitará para la mezcla. Los trituradores de comida “In Sink Erator” van situados debajo del fregadero de las cocinas y Trituran cualquier tipo de comida: verduras, carne, huesos, etc. Con este sistema las tuberías que transportan la comida hasta el tanque de alimentación pueden ser más pequeñas y se evitan problemas de atascamientos. El modelo escogido es el de mayor capacidad de la marca para poder triturar la comida de todos los pasajeros del barco.



Esquema 3 - Triturador fregadero

Se trata del modelo SS-1000, de 10 CV de potencia y capaz de triturar los desperdicios de comida de más de 2500 personas. Este modelo tiene un sistema de control automático de gasto de agua con el que se puede calcular el agua que no habrá que añadir después en el tanque de alimentación.

Para las aguas negras no hace falta triturador porque se desmenuzaran con el mezclador del tanque de alimentación.

5.1.2. Tanque de alimentación

Antes de introducir la biomasa al digestor se mezcla y se homogeniza con agua o con parte del biol que sale del digestor. Normalmente el tanque suele estar construido de acero inoxidable y de forma rectangular con esquinas redondeadas. El tanque de alimentación tiene una entrada de biomasa procedente de los sanitarios y cocinas, una entrada de agua, una entrada de biol, una salida de biomasa que, a través de una bomba será impulsada hasta el digestor, y una tubería de descarga de arenas y/o material inorgánico que pueda haberse formado. Todas estas entradas y salidas deben tener instaladas sus propias llaves de paso. Es de vital importancia que todas estas llaves y válvulas sean de excelente calidad y no de metales dulces como el cobre o bronce que podrían generar serios problemas de corrosión y por consiguiente roturas de graves consecuencias.

El piso del tanque debe tener una pendiente del 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas. La tubería de salida hacia el digestor debe tener una rejilla de acero con una separación de barras de 50 mm. Debe ubicarse 10 cm más arriba del fondo del tanque para que arenas acumuladas en el fondo no descarguen al digestor. En esta tubería debe instalarse un medidor de caudal para comprobar que la alimentación al digestor no se interrumpe o varía igual que la tubería de entrada de agua y biol para poder introducir la cantidad exacta de líquido necesario.

5.1.2.1. Dimensionamiento

El volumen del tanque de alimentación debe almacenar el volumen de 1-2 días del volumen de afluente generado para alimentar al digestor. Los cálculos para conocer la cantidad de agua necesaria son los siguientes:

La cantidad de agua a introducir se calcula partir de la masa seca de la biomasa. Esto es debido a que cualquier materia orgánica sin deshidratar contiene un porcentaje de agua. Este porcentaje de agua que ya viene en la biomasa no hace falta introducirlo. Por eso se utiliza la cantidad de materia seca en lugar de la total.

$$MS = 3,335 \text{ t}$$

La densidad de las aguas negras es aproximadamente de 800 Kg/m^3 y la de los restos de comida mayor de 1100 Kg/m^3 . Se ha considerado como media de toda la biomasa una densidad aproximada de 1000 Kg/m^3 . Por lo tanto:

$$Q = 6130 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} = 6,130 \text{ m}^3$$

$$MS = 3335 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} = 3,335 \text{ m}^3$$

Como se ha explicado en el capítulo 3, el grado de dilución de la mezcla debe ser de aproximadamente el 10% de materia seca y un 90% agua o biol recirculado. El afluente (Af) requerido para el funcionamiento del digestor es:

$$D = 10\%$$

$$Af = \frac{MS}{D}$$

$$Af = \frac{3,335}{0,1} = 33,35 \text{ m}^3$$

Este valor es el volumen total que se introducirá en el digestor, biomasa + agua. Para conocer la cantidad de agua necesaria cada día para la mezcla, solo hay que restarle al afluente la cantidad de biomasa introducida, descontando la parte de materia seca de esta:

$$V_{agua} = Af - (Q - MS)$$

$$V_{agua} = 33,35 - (6,13 - 3,33) = 30,55 \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

Cada día se necesitaran 30,55 m³ de agua o biol para realizar la mezcla. Conociendo estos valores podemos determinar el volumen del tanque de alimentación:

$$V_{tk \text{ alimentación}} \approx 2 \cdot Af$$

$$V_{tk \text{ alimentación}} \approx 2 \cdot 33,35 = \mathbf{66,7 \text{ m}^3}$$

5.1.2.2. Mezcla

Una de las partes fundamentales en la zona de pretratamiento es la homogenización de la mezcla. Es necesario que la biomasa que se introduzca al digestor sea lo más parecida a la que ya hay en el interior. Así la fermentación de la biomasa será más rápida y fácil y el proceso será más efectivo. También hay que procurar que la cantidad de sólidos sea la misma en todo el afluente, no puede haber partes donde el grado de dilución sea mayor al 10% ya que la carga orgánica volumétrica aumentaría y el proceso podría inhibirse.

Para mezclar la biomasa y el agua se utilizara un agitador de alta velocidad que desmenuzará la materia fecal y la mezclará con los residuos de la cocina ya triturados. El modelo escogido es el agitador 4620 de la marca Flygt, con anillo de chorro y con una potencia de 1,5 kW. Las características técnicas son las siguientes:

Tipo: sumergible horizontal

Hélice: inatascable de 3 palas

Diámetro hélice: 210 mm

Potencia: 1,5 kW

Rango empuje: de 1,9 N a 3,4 N

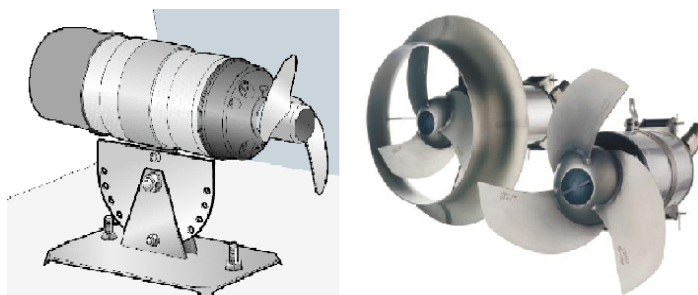
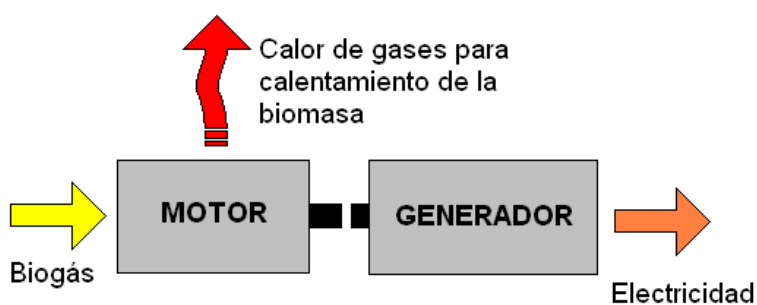


Ilustración 2 - Agitador de alta velocidad

5.1.2.3. Temperatura

El tanque de alimentación tiene que ir provisto de un sistema de calefacción para que la mezcla de biomasa y agua entre a la misma temperatura que la biomasa del interior del digestor. Se utilizará un intercambiador de calor funitubular, tuberías de acero, PVC, etc. por donde pasaran los humos de escape de los motores, calderas, etc. de la zona de cogeneración.



Esquema 4 – Calentamiento biomasa

5.1.2.4. Bombeo

Dependiendo de la ubicación del tanque de alimentación respecto al digestor la carga del digestor puede ser por gravedad o por bombeo. En este proyecto se ha considerado oportuno la instalación de una bomba impulsora para asegurar el caudal necesario en todo momento y evitar obstrucciones. Al alimentar al digestor por bombeo debe preverse la instalación de dos bombas que funcionen alternativamente. De esta manera se puede mantener la alimentación en caso de avería o tareas de mantenimiento. En el pozo de bombeo se deben colocar las válvulas y medidores de

caudal, manómetros, cierre y antiretorno. Antes de la descarga de la biomasa al pozo de bombeo debe haber una rejilla para evitar que partículas sólidas demasiado grandes puedan obstruir o romper la bomba. Para el sistema de impulsión se deben utilizar bombas de acero inoxidable, u otro material que no se oxide o corroa con facilidad. Estas bombas deben tener un sistema de trituración incorporado. El modelo de bomba seleccionado es el F3000 de la marca Flygt con un impulsor tipo F utilizado para aguas negras fuertemente contaminadas y purines, ya que asegura que las fibras largas y cuerpos voluminosos queden cortados en pequeños fragmentos.

Tipo: sumergible de flujo radial

Impulsor: cortante

15 m³/h a 30 metros

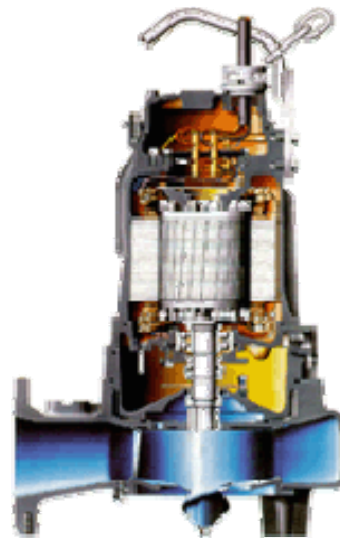
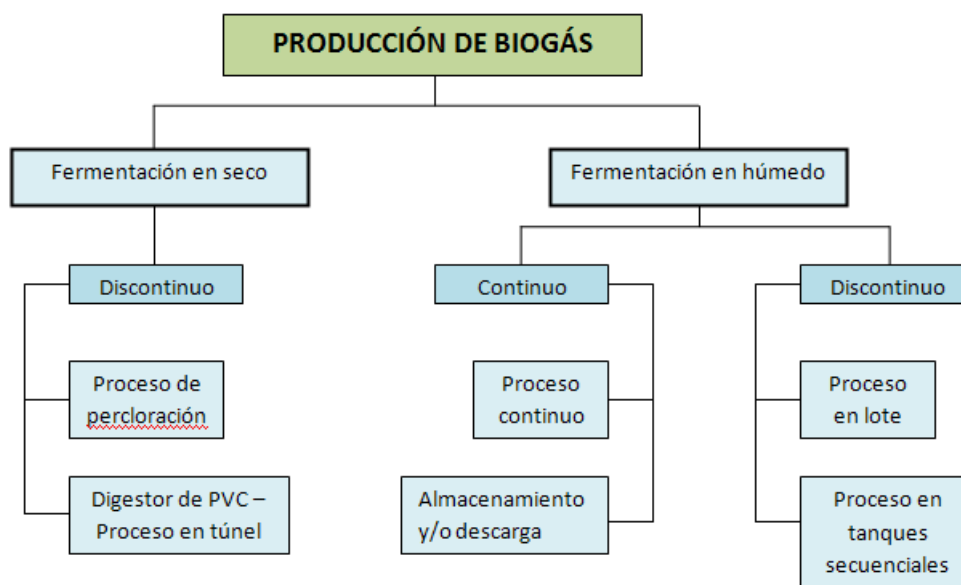


Ilustración 3 - Bomba trituradora

5.2. Digestor

El digestor es el elemento más importante de la instalación y es donde se producirá la fermentación de la biomasa y se generará el biogás. Los digestores se clasifican por el proceso o modo de operación, llenado y vaciado. En el diagrama siguiente se expone la clasificación general de los digestores por su forma de operación.



Esquema 5 - Tipos de digestores

El proceso de fermentación seca se refiere a que la mezcla contiene un 20% o más de MS y la fermentación húmeda se refiere a que contiene un 15% o menos de MS. Los procesos más utilizados son los de fermentación en húmedo.

Para este proyecto se ha utilizado un digestor de régimen o mezcla continua CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor - digestor de agitación continua). Este tipo de digestores permite controlar la digestión con el grado de precisión que se requiera. Permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso, en cuanto es detectada. Permite manejar las variables relacionadas, carga específica, tiempo de retención y temperatura. La tarea de puesta en marcha sólo se vuelve a repetir cuando hay que vaciar el digestor por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de biomasa y fertilizante no requieren ninguna operación especial.

Este tipo de digestores a diferencia de otros requieren menores tiempos de retención (de 10 a 30 días). Son aplicados a residuos con un alto porcentaje de sólidos totales, es decir, aquellos con una COV elevada, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato. En este tipo de digestores la biomasa es mezclada por agitadores instalados en su interior que proporcionan el movimiento lento y constante a la biomasa para facilitar la generación de biogás. Tienen altos costos de construcción y operación debido a la complejidad del sistema y su mantenimiento,

pero consiguen un elevado rendimiento de obtención de metano. Son digestores muy utilizados en sitios donde se tiene poco espacio como es el caso de este proyecto.

Las características operacionales de este proceso son:

- Densidad de carga orgánica ($\text{Kg DQO/m}^3/\text{d}$): 1 - 6
- **Concentración en el interior ($\text{Kg MV/m}^3/\text{d}$): 2 - 5**
- Concentración en el efluente ($\text{Kg MS/m}^3/\text{d}$): 25 - 100
- **Tiempo de retención hidráulico (d): 10 – 30**

Para el diseño de los digestores hay que considerar los siguientes aspectos mínimos e instalaciones:

- Deben ser herméticamente sellados y no permitir el escape de biogás ni filtraciones de biomasa
- Se debe instalar un sistema de calefacción para mantener la temperatura del proceso
- Deben tener un sistema de agitación para la mezcla de la biomasa al interior del digestor
- Hay que prever instalaciones o tuberías para la descarga de sedimentos que se acumula en el fondo del digestor
- Se debe instalar tuberías de descarga de bioabono y lodos
- Debe tener una tubería de rebose
- Debe tener un sistema de captación de biogás y las respectivas válvulas de seguridad de sobrepresión y supresión
- Se debe instalar un ojo de buey o una ventanilla para observar el proceso o formación de espumas o costras en la superficie
- Se debe instalar un sistema para la medición de temperatura, nivel, pH, y un sistema para el control de todo el proceso
- De tener instalaciones para la alimentación de biomasa con su respectivo medidor de caudal

Además se debe prever que los materiales que se utilicen para la construcción sean adecuados para el medio en que van a operar. Normalmente digestores de estas características se construyen de hormigón o acero, pero al estar instalado en un buque se procurará utilizar el material menos pesado, en este caso el acero. Se trata de un medio acuoso, con alta humedad en donde se forman gases que pueden ser agresivos, por lo tanto el acero debe ser inoxidable. Como zona especialmente problemática en el interior del digestor hay que destacar la transición entre el nivel máximo de llenado y la zona en donde se almacena el biogás. Los gases y partículas ácidas de esa franja pueden ser muy corrosivos, por lo tanto hay que prever revestimientos epóxicos o esmaltados para los materiales de esta zona.

5.2.1. Elementos

5.2.1.1. Cubierta

La cubierta del digestor es de un material de caucho ideal para construcciones de este tipo. La membrana de este material es capaz de estirarse hasta 4 veces su tamaño sin sufrir daños ni deformaciones. Es necesario que la cubierta sea resistente pero a la vez flexible para poder almacenar el biogás sin que se produzcan fugas. Las propiedades más significativas que debe tener la cubierta son las siguientes:

- Debe ser muy resistente a la corrosión
- Debe ser muy resistente al calor, oscilando su campo de temperaturas entre los 5°C y los 130°C
- Debe ser muy resistente al agua en general, y sobre todo a las aguas cloacales y residuales.
- Debe ser de fácil reparación en caso de fuga. Al estar fabricada de un material parecido al caucho policloropreno – neopreno se pueden utilizar colas especiales para pegar añadidos.
- Debe ser suministrada en una sola pieza, en lo posible soldada en fábrica
- La adherencia al metal debe ser idónea. El mejor método de unión membrana – acero es mediante autoclave por reticulación con calor.

La cubierta se instala al final de la construcción, cuando todas las pruebas de estanqueidad y funcionamiento de tuberías, agitadores y bombas se hayan realizado satisfactoriamente. Es en la cubierta donde va instalada la tubería de salida del biogás como se explicará más adelante.

5.2.1.2. Aislamiento

Para evitar las pérdidas de calor en el digestor hay que aislar las paredes con materiales aislantes. Se puede utilizar generalmente todo tipo de material aislante que se instala para aislar tuberías de calor, calderas, paredes de viviendas, etc.

La utilización de materiales de origen natural permita abaratar costos y, debido a su mayor ligereza, reducir la carga que deben soportar los elementos estructurales sobre los que se apoyan los digestores. Entre los materiales naturales más frecuentes se encuentran el cáñamo, la madera y las fibras de celulosa, lanas naturales y animales, corcho, fibras de caña, de madera, de paja y cartones aglomerados con sustancias resinosas.



Ilustración 4 - Tipos de aislantes

También existen aislantes industriales como el poliestireno expandido que se presenta en pequeños gránulos, que colocados en un molde adecuado y sometido al calor expande 40 veces su volumen soldándose entre sí, formando una plancha de aislante. Es un material extremadamente ligero e inalterable por el agua dulce o salada. Su nombre comercial es el “porespan”, corcho blanco, etc.

Otro aislante industrial es la fibra de vidrio, que posee grandes condiciones aislantes, así como también confiere gran dureza y rigidez si se le añade un núcleo plástico y que contribuye a su resistencia anticorrosiva. Por estos motivos los PRFV o plásticos reforzados con fibra de vidrio se utilizan cada vez más en la construcción y la industria.

El coeficiente de conductividad es un valor específico de cada material que significa la capacidad del material de conducir el flujo calórico, independientemente del espesor del material. Se considera un material como aislante cuando su coeficiente de conductividad es menor a 0,1 W/mK. Cuanto menor es este valor mejor aislante es el material. Para que un material pueda ser utilizado como aislante en los digestores debe tener un coeficiente de conductividad entre 0,03 y 0,05 W/mK. El espesor ideal del aislante debe ser entre 10 y 15 cm.

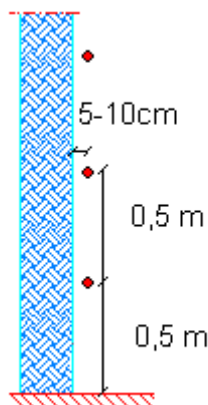
5.2.1.3. Calefacción de los digestores

Para lograr una óptima degradación de la materia orgánica en el interior del digestor y dependiendo de las temperaturas seleccionadas para el proceso y el tipo de biomasa que se utiliza, es necesaria la instalación de sistemas de calefacción en el interior del digestor para mantener una temperatura casi constante. Como en este proyecto se utiliza un régimen de fermentación termofílico, habrá que mantener una temperatura alrededor de los 55°C. Es muy importante que no se produzcan cambios bruscos de temperatura ni bajones de duraciones mayores a 4 horas ya que pueden inhibir y paralizar el proceso de digestión.

Los sistemas de calefacción consisten en un conjunto de tuberías en el interior del digestor que actúan como intercambiadores de calor. Se aprovecha el calor que se produce por el enfriamiento de los motores y se recircula por el interior de los tubos. Para los sistemas de calefacción se utilizan tuberías de PVC o PE o acero inoxidable. Normalmente se utilizan tuberías de PE ya que los costos de construcción son inferiores a las de acero inoxidable, pero estas últimas tienen un mayor coeficiente de transferencia de calor.

Estos sistemas se instalan sostenidos a las paredes por medio de soportes o ganchos. La primera tubería debe instalarse a 0,50 m sobre el fondo del digestor. La separación

desde las paredes del digestor debe ser de 5-10 cm. La separación horizontal de cada tubería debe ser aproximadamente 50 cm. El sistema de calefacción debe cubrir al menos 1/3 de la altura del digestor.



Esquema 6 - Pared digestor

Para hacer una estimación de la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema de calefacción de un digestor se puede determinar que para una temperatura exterior de 20°C (temperatura usual cerca de la sala de máquinas) y una temperatura de la biomasa de 15°C se requiere una potencia de 1,25 kW por cada 100 m³ de digestor. Por lo tanto:

$$P_{calefacción} = V_{digestor} \cdot \frac{1,25}{100} = 11,5 \text{ kW}$$

5.2.1.4. Agitadores

Los sistemas de agitación son necesarios para lograr una mejor distribución de la temperatura, de los nutrientes, la remoción de las burbujas de biogás producidas por las bacterias metanógenas y un mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana existente en el digestor. Además se evita la formación de costras sobre la superficie de la biomasa y la formación de espacios muertos sin actividad biológica.

El agitador escogido para este proyecto es el modelo SR 4410 de la marca Flygt. Se trata de un agitador sumergible de baja velocidad y es empleado para mover grandes

volúmenes de líquidos con baja viscosidad. Las características técnicas son las siguientes:

Tipo: sumergible horizontal

Hélice: inatascable de 2 palas

Diámetro hélice: 1,4 m

Potencia: 2,3 kW

Rango empuje: de 450 N a 2,2 kN

Velocidad motor: 1450 rpm

Transmisión: reductora de doble engranaje
cilíndrico helicoidal

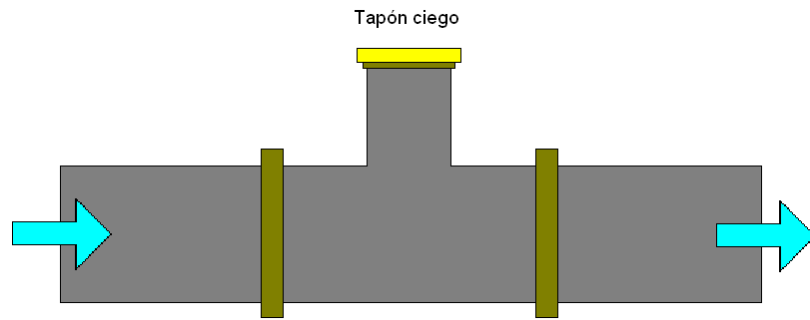


Ilustración 5 - Agitador de baja velocidad

Otro sistema de agitación consiste en introducir parte del biogás generado para que la biomasa del interior del digester burbujee y se desprenda el metano. El biogás introducido terminará saliendo otra vez por la parte superior de la cubierta.

5.2.1.5. Tuberías, válvulas y desagües

La biomasa homogenizada en el tanque de mezcla o de alimentación se conduce al biodigestor por medio de tuberías. La impulsión se puede realizar por medio de bombas o por gravedad, dependiendo de la colocación del tanque de alimentación respecto al digester. Las tuberías deben dimensionarse hidráulicamente para los volúmenes de carga máxima y considerando todas las pérdidas del sistema. El diámetro que se seleccione para las tuberías depende también del tipo de biomasa que se va a conducir. Las tuberías deben instalarse con una pendiente mínima del 0,5% para permitir que se vacíen por gravedad. Se debe prever la instalación de accesorios para limpieza en caso de obstrucción. Una solución al problema de las obstrucciones es la instalación de una T con un tapón ciego en la bifurcación.



Esquema 7 - Tubería

Es imprescindible que cada cierto tramo de tuberías se instale llaves de paso de cierre rápido y de media vuelta para el cierre del flujo. También se deben instalar válvulas antiretorno antes y después de cada elemento de la instalación. De esta manera se pueden llevar a cabo cualquier tarea de limpieza o reparación.

El tanque de alimentación, el digestor y el tanque de descarga deben tener un desagüe fuera del barco para poder vaciarlos si fuese necesario por razones de mantenimiento o por fuerza mayor.

5.2.2. Dimensionamiento

El volumen del digestor depende de la cantidad y tipo de biomasa, de la carga orgánica volumétrica (COV) y del tiempo de retención seleccionado. Dependiendo de estas variables se diseñan y construyen los digestores.

El volumen útil del digestor está fuertemente ligado al tiempo de retención hidráulica (TRH) y la cantidad de afluente introducido por día (A_f). Como se puede comprobar en la siguiente fórmula a mayor tiempo de retención mayor será el volumen del digestor, siempre y cuando no varíe la cantidad de afluente introducido.

$$V_{digestor} = A_f \cdot TRH$$

El afluente que entra en el digestor es prácticamente la misma cantidad que el biol que sale ya que el 90% de la dilución es agua y del 10% restante sólo se habrá degradado entre un 45% y un 70%. Esta cantidad es pequeña en comparación con el volumen de afluente por lo tanto no se considera esta reducción de volumen por razones de seguridad. Se puede decir que el volumen de afluente que entra es el que sale. Por eso la fórmula para saber el volumen del digestor es simple, sólo hay que calcular el volumen necesario para almacenar el afluente de x días.

Una vez conocido el volumen del digestor hay que comprobar que el valor de la carga orgánica volumétrica esté dentro de los límites, de no ser así el proceso podría inhibirse. Para conocer la COV se utiliza la siguiente fórmula:

$$COV = \frac{MV}{V_d}$$

Como ya se ha definido en el capítulo 3, se entiende por COV a la cantidad de materia orgánica volátil (MV) con la que se alimenta diariamente al biodigestor por m^3 de volumen de digestor. Se define en Kg de MV por m^3 de volumen de digestor (Kg MV/ m^3).

Al utilizar un régimen termofílico y un digestor de agitación constante CSTR se pueden tolerar valores de COV más altos que la media. Se ha considerado que el valor adecuado de COV es de 4 Kg MV/ m^3 y para conseguir este valor es necesario un TRH de 23 días. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$Af = 33,35 \text{ m}^3$$

$$TRH = 23 \text{ días}$$

$$V_{digestor} = 33,35 \cdot 23 = 767,05 \text{ m}^3$$

Se comprueba el valor de la carga orgánica volátil:

$$MV = 3053 \text{ kg}$$

$$COV = \frac{3053}{767,05} = 4 \text{ Kg } Mv/m^3 \text{ digestor}$$

El volumen total del digestor comprende el volumen útil, más el volumen para almacenamiento del biogás y un % de seguridad (borde libre). Generalmente se asigna como % de seguridad un 20% del volumen del digestor calculado. Se asigna este % de seguridad para cubrir eventuales variaciones en la producción de biomasa. El volumen total del digestor es el siguiente:

$$V_{total\ digestor} = V_{digestor} + \% \text{ seguridad}$$

$$V_{total\ digestor} = 767,05 \cdot \frac{120}{100} =$$

$$V_{total\ digestor} = 920,5 \text{ m}^3$$

5.3. Zona de deshidratación

Del afluente total que entra en el digestor el 90% es agua y no se degrada. Del 10% restante del afluente, solo se degrada como máximo un 72% (porcentaje degradación aguas negras, capítulo 4). Por tanto, podemos decir que como máximo un 7% del afluente introducido termina siendo biogás. En el digestor se encuentra cerca de un 93% del afluente introducido que no generará metano y hay que extraerlo de allí para darle paso a un nuevo afluente que contiene biomasa fresca capaz de generar biogás. A este residuo se le llama biol o bioabono.

5.3.1. Tanque de descarga y tratamientos

Al ser un volumen tan pequeño el que se degrada en el digestor, se considera que el volumen de biol diario es el mismo que el volumen de afluente diario. No se considera la reducción de volúmenes para tener un margen de seguridad. Por lo tanto el volumen del tanque dependerá del volumen del afluente al digestor y del número de días que se tardará en vaciarlo.

El biol se debe almacenar en el tanque de descarga para su posterior evacuación en el puerto de origen del crucero. Este crucero realiza una ruta que dura 8 días. En el puerto de origen se tendrá subcontratada la recogida y transporte del bioabono para su posterior venta a empresas agrícolas para su utilización como fertilizante. Por lo

tanto el volumen del tanque de descarga deberá poder contener la producción de biol de 8 días.

$$V_{tk\ descarga} = Af \cdot 8\ días = 33,35 \cdot 8$$

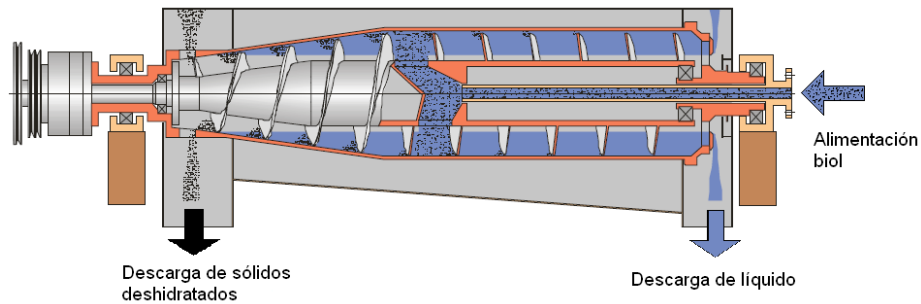
$$V_{tk\ descarga} = 266,8\ m^3$$

El volumen del tanque de descarga es demasiado elevado y ocupa mucho espacio. Por esta razón es necesario la instalación de una centrifuga para lodos para poder deshidratar el biol y que este ocupe menos volumen. Antes del tanque de descarga se instalará un decanter HTS C3E-4 de la marca Flottweg.



Ilustración 6 - Centrifugadora

Este producto ha sido diseñado exclusivamente para poder tratar los lodos procedentes de aguas residuales urbanas e industriales. La parte esencial de un decanter es el rotor, el cual consiste en un tambor cilíndrico/cónico, con un tornillo sinfín transportador incorporado, que gira a una cierta velocidad. El rotor está accionado por un motor eléctrico. Ambos se unen a través de poleas y correas. El biol entra en el rotor a través de un tubo de alimentación central. Gracias a las boquillas de salida (toberas) situadas en el cuerpo del sinfín, el biol pasa por el tambor, dónde tiene lugar la separación por fuerza centrífuga. La parte líquida cae por gravedad al fondo del decanter y es evacuada por una tubería de descarga. Este líquido residual se insertará en la zona de pretratamientos para realizar la mezcla de la biomasa con agua. La parte sólida es transportada por el tornillo sinfín hasta la parte cónica para su evacuación hacia el tanque de descarga.



Esquema 8 - Centrífugadora

Las características técnicas del decanter HTS C3E-4 son las siguientes:

- Peso: 1700 kg
- Potencia: 22 kW
- Capacidad de alimentación: 5-20 m³/h
- Dimensiones: L = 2980 mm
W = 940 mm
H = 900 mm

$$Volumen_{decanter} \approx 2,98 \cdot 0,94 \cdot 0,90 \approx 2,52 \text{ m}^3$$

Con esta centrífuga podemos reducir el volumen del biol que sale del digestor en un 50% en el caso más favorable. Como es un valor que solo se da en lodos fáciles de deshidratar, se ha considerado que se podrá deshidratar como máximo hasta un 40% el volumen inicial. Por lo tanto, el volumen final del tanque de descarga es:

$$V_{tk\text{ descarga}} = 266,8 \cdot \frac{60}{100} = 160,1 \text{ m}^3$$

5.3.2. Utilización del biol

Una vez centrifugado el biol se obtiene el mismo producto pero con menor cantidad de líquidos. Este biol deshidratado sigue conservando los nutrientes de la materia orgánica (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Hierro y otros) pero se han eliminado en el

digestor todos los gérmenes y parásitos que podía contener el producto. Esta combinación de nutrientes sin elementos nocivos hace que el biol tenga las propiedades de un fertilizante perfecto y pueda ser vendido como abono de alta calidad para cultivos agrícolas.

El biol se descargará a través de una tubería de salida del tanque de descarga hasta el exterior donde se depositará en contenedores, camiones o trenes para su posterior transporte a la empresa compradora. Como se ha comentado anteriormente esta operación se realizará siempre en el puerto base, es decir, el puerto de comienzo y final de la ruta del crucero, ya que de esta manera es más fácil unificar toda la operación y reducir gastos de descarga.

5.4. Zona de cogeneración

Una vez la biomasa se ha degradado y la digestión se ha completado se obtiene por un lado el biol y por otro un gas de alto poder calorífico, el metano. Este gas, tal y como sale del digestor no puede ser utilizado para su combustión ya que todavía contiene partículas de agua (H_2O) y partículas de otros gases contaminantes. Por eso es necesario un acondicionamiento previo a su aprovechamiento en las unidades de producción de energía eléctrica o calor. A continuación se indican las características del biogás que deben acondicionarse:

- Captación y transporte del biogás
- Eliminación de condensados (H_2O)
- Reducción y/o eliminación del H_2S
- Corrección, calibración y control de presión

Los fabricantes de motores, calderas, etc. tienen requerimientos mínimos para la calidad del biogás. Estos requerimientos de calidad deben respetarse para garantizar la vida útil de los equipos y sus intervalos de mantenimiento.

5.4.1. Captación y transporte del biogás

Este es una de los apartados más importantes por su peligrosidad ya que una fuga de biogás podría degenerar en un accidente fatal. Es por eso que la mayoría de países que trabajan con este tipo de instalaciones han adoptado las normas ANSI/ASME B 31,8 edición 1992, Gas Transmission and Distribution Piping Systems y el Reglamento DOT, Pipeline Safety Regulations, Part 191 -Part 192, Minimum Federal Safety Standards., Title 49, Code of Federal Regulations, Pipeline Safety, edición 1986, de los Estados Unidos de Norteamérica, para los aspectos de mantenimiento y operación.

La instalación de las tuberías de biogás debe realizarse con mucho cuidado por personal especializado ya que alrededor del 60% del mal funcionamiento de los biodigestores se debe a fallos en esta parte de la instalación.

Los problemas que presenta son los mismos que cualquier instalación de gas, con el inconveniente adicional de que el biogás está saturado por un 100% de vapor de agua y contiene ácido sulfhídrico. Por tanto no se pueden utilizar otro tipo de tuberías que no sean de acero inoxidable, galvanizadas de acero (HG) y/o de PVC rígido o de caucho ya que si no se corroerían en un espacio de tiempo muy corto.

Todas las tuberías deben tener una pendiente de mínimo un 0,5% para que puedan ser drenadas las aguas de condensado que se forman en su interior. En cada tramo con cambio de pendiente se deberá instalar una llave de cierre para la eliminación de agua de condensados. Siempre se deben prever como mínimo 2 puntos de captación de biogás ubicados en lados opuestos.

Los tramos visibles de las tuberías de captación tienen que ser de hacer inoxidable. Todas las tuberías de biogás deben pintarse de amarillo con una flecha que indique la dirección del flujo. Las tuberías de captación de biogás se unen formando una tubería principal que transporta el biogás a los sistemas de purificación y aprovechamiento. Se debe sellar bien las zonas de paso o cruce de tuberías para evitar fugas de gas.

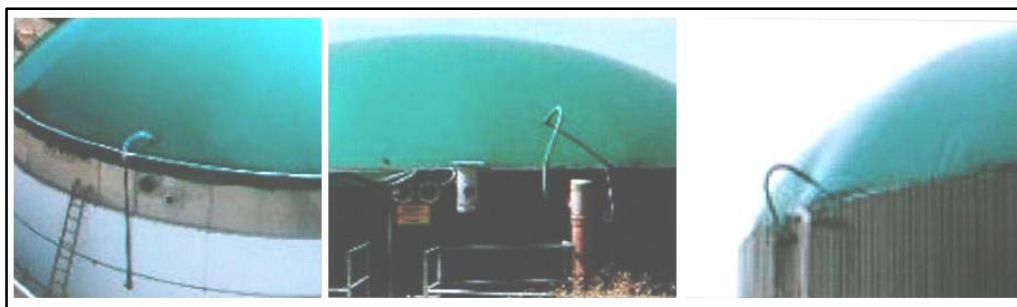


Ilustración 7 - Tuberías extracción biogás

Para evitar presiones mayores a 2-5 mbar y presiones negativas dentro del digestor, es importante la instalación de dos válvulas de control de presiones para evitar estos dos casos. Si la presión interna del digestor es negativa podría llegar a aspirarse oxígeno al interior y causa explosiones si es que el biogás alcanza niveles críticos de mezcla. Una sobrepresión significaría la rotura de la membrana y una liberación masiva de biogás que podría desencadenar en una explosión.



Ilustración 8 - Válvula sobrepresión

5.4.2. Eliminación de H₂O

El agua es un componente no combustible y que al estar unido al metano no permite que éste prenda correctamente pudiendo suprimir la combustión. Es necesario eliminarla para obtener un biogás con la mayor proporción de metano posible. La manera de eliminar el agua saturada es haciendo pasar la tubería que transporta el biogás por un pozo o cuba de condensados. El pozo de condensados es un recipiente a bajas temperaturas donde al pasar el gas, el agua se condensa y cae al fondo del

recipiente. Las partículas representadas en azul son de agua y las de color verde de metano. Las partículas representadas con otros colores son de gases contaminantes que posteriormente se eliminarán.

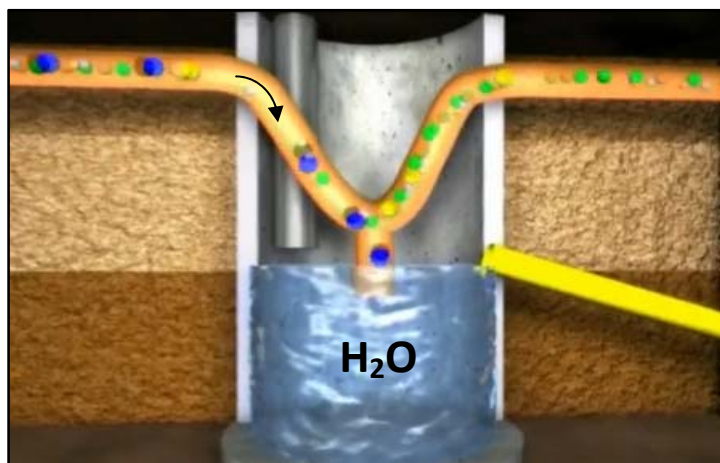


Ilustración 9 - Cuba de condensados

5.4.3. Eliminación de H_2S

Extraer el sulfhídrico (H_2S) del biogás es imprescindible para evitar problemas de corrosión en equipos y motogeneradores, además de cumplir con las normativas de emisión medioambientales (reducir emisiones de SO_2 al quemar el biogás).

Por lo general el biogás, contiene una concentración sulfhídrico (H_2S), producido por proteínas y sulfatos, entre 1000 y 6000 ppm. Existen distintos métodos de eliminación del H_2S :

- Lavados químicos ($NaOH$, $FeCl_3$)
- Adición de óxidos metálicos
- Tratamientos biológicos

Para este proyecto se ha utilizado el tratamiento biológico por ser el de menor coste de mantenimiento como se demostrará más adelante.

A diferencia de la digestión anaeróbica, para este método se emplean unas bacterias aeróbicas, especializadas en la oxidación del H_2S convirtiéndolo en azufre elemental y ácido sulfúrico. Para ello es necesario aportar al biogás una proporción exacta de aire y

mantener las condiciones de temperatura y pH óptimas. Todo ello se realiza dentro de un reactor fabricado con PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio) con un relleno de PP que hace de soporte para las bacterias y aumenta la superficie de contacto con el biogás.

Los nutrientes utilizados para introducir las bacterias aeróbicas pueden proceder de distintos recursos naturales, aunque el más utilizado es el fertilizante líquido artificial (FLA).

Los subproductos obtenidos son: agua, azufre (S) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) que se diluyen en la etapa final de clarificación en la planta de depuración de aguas del buque.

A continuación se presenta un ejemplo real para comprobar que la utilización del tratamiento biológico es mucho más económica que los lavados químicos. Para una planta de biometanización de RSU (Residuos Sólidos Urbanos) con una producción de biogás de $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ y una concentración de H_2S de entrada de 2000 ppm a reducir hasta 200 ppm para consumo en motogeneradores, supone eliminar unos 6 kg/h de H_2S con los siguientes costes:

Consumible	Coste	Consumo por kg H_2S /h eliminado	Consumo anual	Coste anual
NaOH	0,37 €/kg	5-7 kg/h NaOH	315.000 kg	116.000 €/año
FeCl_3	0,35 €/kg	10 kg/h FeCl_3	480.000 kg	168.000 €/año
FLA	0,25 €/kg	2,5 kg/día FLA	5.500 kg	1.400 €/año

Tabla 5 - Eliminación de sulfhídrico

El ahorro es muy significativo y permite amortizar la inversión en poco tiempo.

5.4.4. Corrección, calibración y control de presión

Una vez eliminadas las partículas de agua y sulfhídrico indeseables, el biogás sale prácticamente sin presión. Gracias a unos compresores se comprime el biogás a la presión necesaria para la posterior combustión. Esta presión nunca debe superar los 5 mbar ya que el riesgo de explosión en caso de fuga es muy elevado.

Una vez comprimido, el biogás se analiza continuamente de forma automática por unos dispositivos instalados en varios puntos de las tuberías posteriores al tratamiento de desulfurización y compresión. Estos dispositivos se encargan de analizar el contenido de metano, ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y oxígeno del biogás. Esto garantiza un alto grado de eficiencia y fiabilidad de funcionamiento.

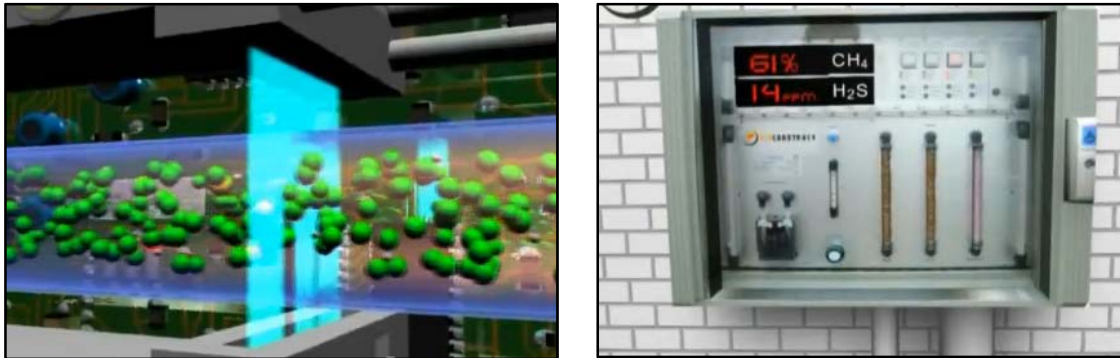


Ilustración 10 - Sistema de control del biogás

Los dispositivos de control serán los encargados de advertirnos si aparece algún problema:

- Baja producción de biogás
- Alta concentración de ácido sulfhídrico
- Baja concentración de metano
- Etc.

5.4.5. Antorcha

Las antorchas son unos elementos de seguridad utilizados para quemar el exceso de biogás, o en caso de avería poder quemar el biogás existente en la parte alta del digestor y en las tuberías. De todos modos hay que evitar en la medida de lo posible la combustión del biogás en antorchas ya que es una pérdida de energía generada y además contamina mucho. La mayoría de veces, para los periodos de mantenimiento de los motores, calderas, etc. que consumen el biogás, se dispone de un generador stand by de emergencia que entra en operación en estos casos.



Ilustración 11 - Antorcha

Las antorchas para quema de biogás se construyen generalmente en acero inoxidable, e incorporan en la misma unidad un medidor de caudal y un sistema corta llamas. Las antorchas deben ser de encendido automático y de combustión encapsulada. Normalmente se instala un filtro para la depuración del biogás y la eliminación de ácido sulfhídrico como H_2S .

La antorcha debe ir instalada en el exterior del buque y en la parte más alta posible para no provocar molestias a los pasajeros.

6. ASPECTOS TECNICO-ECONÓMICOS

6.1. Descarga residuos MARPOL

La planta de metanización instalada en el buque utiliza los residuos detallados en los anexos IV y V del convenio MARPOL 73/78, es decir, aguas sucias de los buques y basuras de los buques, respectivamente. Al utilizar estos residuos para generar biogás ya no será necesario descargarlos al llegar a puerto y por lo tanto se ahorrará el coste de esta operación. A continuación se han realizado los cálculos que supondría la descarga de estos residuos y así determinar el valor económico ahorrado. Las tarifas de descarga seleccionadas son la media de las tarifas de diferentes puertos españoles (Bilbao, Marín, Ferrol, Las Palmas).

❖ Residuos MARPOL IV

Como se ha calculado en el capítulo 4, la cantidad de aguas negras generadas en el buque es entre 1,51 m³/día y 1,69 m³/día en función de la cantidad de pasajeros (mínima-máxima ocupación). Si se considera que el buque detiene sus travesías tan solo 25 días al año para labores de mantenimiento, inspecciones, imprevistos, etc. quedan 340 días operacionales durante los que el buque funciona a pleno rendimiento. Por lo tanto, se genera anualmente la siguiente cantidad de aguas negras:

$$1,51 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 340 \text{ días} = 513,4 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$1,69 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 340 \text{ días} = 574,6 \text{ m}^3/\text{año}$$

La tarifa de descarga de los residuos MARPOL IV es de aproximadamente 125 €/m³, por lo tanto el coste anual de descarga de estos residuos es:

$$513,4 \text{ m}^3/\text{año} \cdot 125 \text{ €/m}^3 = 64\,175 \text{ €/año}$$

$$574,6 \text{ m}^3/\text{año} \cdot 125 \text{ €/m}^3 = 71\,825 \text{ €/año}$$

El coste de descarga medio de las aguas negras del buque es aproximadamente de 68 000 € anuales. Este valor no contempla el tratamiento de estos residuos, que tiene un valor añadido.

❖ Residuos MARPOL V

La cantidad de residuos orgánicos generados en el buque que terminarían a la basura está entre 3,98 m³/día y 4,44 m³/día en función del número de pasajeros. Anualmente se generan:

$$3,98 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 340 \text{ días} = 1\,353,2 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$4,44 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 340 \text{ días} = 1\,509,6 \text{ m}^3/\text{año}$$

La tarifa de descarga de las basuras contempladas en el anexo V del MARPOL es de aproximadamente 40 €/m³. El coste anual de la descarga de las basuras orgánicas del buque es:

$$1\,353,2 \text{ m}^3/\text{año} \cdot 40 \text{ €/m}^3 = 54\,128 \text{ €/año}$$

$$1\,509,6 \text{ m}^3/\text{año} \cdot 40 \text{ €/m}^3 = 60\,384 \text{ €/año}$$

El coste de descarga medio de los residuos orgánicos del buque es de aproximadamente 57 000 € anuales.

- Los costes totales mínimos y máximos de descarga de los residuos utilizados en la planta de metanización son de **118 303 €/año** y **132 209 €/año**.

6.2. Venta del Biol

Una vez la biomasa ha fermentado en el digestor esta se transforma en biogás y biol. El biol, como se ha explicado anteriormente, puede ser utilizado como abono de alta calidad ya que sigue conteniendo los nutrientes necesarios para las plantas. Al no ser un residuo no es necesario pagar la tarifa de retirada de residuos y es tratado como

una carga. Una vez descargado en camiones y transportado a una granja o a una industria de fabricación de abono, por ejemplo, el biol se introduce en un secadero y se realiza un secado indirecto que produce vapor de agua y fertilizante en polvo. El fertilizante se peletiza (pellets) y es vendido como abono de alta calidad. Según un documento sobre digestores anaerobios del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), entidad pública empresarial adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, este fertilizante en pellets puede ser vendido a un precio del orden de 40 – 45 € la tonelada.

Como se ha comentado en el capítulo 5 la cantidad de efluente descargado del digestor para fabricar bioabono es de 33,35 m³ al día. Con la centrífuga instalada en el buque y el posterior secado se puede extraer hasta un 70% del líquido que contiene el biol. Por lo tanto, la cantidad de materia utilizada para abono es:

$$33,35 \text{ m}^3/\text{día} \cdot \frac{30}{100} = 10 \text{ m}^3/\text{día}$$

Anualmente se genera la siguiente cantidad de fertilizante peletizado:

$$10 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 340 = 3\,400 \text{ m}^3/\text{año}$$

Si este producto puede ser vendido a 40 € la tonelada y la densidad del biol es de 1000 Kg/m³ se puede obtener un beneficio anual de:

$$3\,400 \text{ t/año} \cdot 40 \text{ €/t} = 136\,000 \text{ €/año}$$

A este valor habrá que restarle los costes de transporte y secado.

6.3. Biogás producido

Haciendo referencia al capítulo 4 y resumiendo los cálculos, se pueden generar las siguientes cantidades de biogás (m³ al día):

	7565 personas	8461 personas
Aguas negras	298,05	333,35
Comida desperdiciada	797,65	890,94
Restos cocinas	104,58	116,97
TOTAL	1200,28 m ³ /día	1341,26 m ³ /día

Tabla 6 - Volumen de biogás producido

Este biogás puede ser utilizado en calderas, motores térmicos modificados, turbinas, etc. para generar energía que moverá las hélices o alternadores. El Oasis of the Seas es un buque que utiliza principalmente fuel-oil. El biogás generado en el digestor sustituirá parte del fuel-oil utilizado para generar energía. A partir de la relación entre m³ de biogás y litros de fuel-oil se puede dictaminar el ahorro en la compra de este combustible ya que no será necesario adquirirlo. La relación entre biogás y fuel-oil, como se comenta en el capítulo 3, es que 1 m³ de biogás genera la misma energía que 0,71 litros de fuel-oil. Por lo tanto:

Mínima ocupación

$$1\,200,28\,m^3\,de\,biogás/día \cdot 340\,días = 408\,095,2\,m^3\,de\,biogás/año$$

$$408\,095,2\,m^3\,de\,biogás/año = 289\,747,59\,l\,de\,fuel - oil/año$$

Máxima ocupación

$$1\,341,26\,m^3\,de\,biogás/día \cdot 340\,días = 456\,028,4\,m^3\,de\,biogás/año$$

$$456\,028,4\,m^3\,de\,biogás/año = 323\,780,64\,l\,de\,fuel - oil/año$$

Según un informe de la *International Energy Agency* (IEA), en julio de 2011 el precio del fuel-oil en España ha sido de 540,78 € la tonelada. A partir de los cálculos siguientes se puede determinar el ahorro económico en la compra de fuel-oil:

- Densidad fuel oil = 0,97 g/cm³

Mínima ocupación

$$289\,747,59\,l \cdot \frac{1\,m^3}{1000\,l} \cdot 0,97 \frac{t}{m^3} = 281,05\,t$$

$$281,05\,t \cdot 540,78\,\frac{€}{t} = \mathbf{152\,000\,€/\text{año}}$$

Máxima ocupación

$$323\,780,64\,l \cdot \frac{1\,m^3}{1000\,l} \cdot 0,97 \frac{t}{m^3} = 314,07\,t$$

$$314,07\,t \cdot 540,78\,\frac{€}{t} = \mathbf{170\,000\,€/\text{año}}$$

El coste de construcción de la instalación depende de la utilización final del biogás pero con el ahorro en compra de fuel-oil, unos 160 000 € anuales de media, puede ser amortizado en pocos años.

6.4. Espacio utilizado

Finalmente es necesario calcular el espacio requerido para la planta de metanización y establecer si podría ubicarse en el espacio utilizado para los tanques de almacenamiento de aguas negras, en caso de que el buque los tuviera.

El volumen de los elementos de la instalación son los siguientes:

Tanque alimentación	66,7
Digestor	920,5
Decanter - centrifuga	2,52
Tanque descarga	160,1
TOTAL	1450 m³

Tabla 7 - Volúmenes elementos planta de metanización

Hay que tener en cuenta, además, el espacio necesario para las bombas, tuberías, válvulas, cuba de condensado, compresores y espacio entre elementos. Se ha considerado que este valor es un 40% del volumen necesario para los elementos de mayor tamaño. Por lo tanto:

$$V_{total\,planta\,metanización} = 1450\,m^3 \cdot \frac{140}{100} = 2030\,m^3$$

Son necesarios 2030 m³ para ubicar la planta de metanización.

Con la finalidad de saber cual es el espacio ocupado por los tanques de almacenamiento de aguas residuales no tratadas se establecieron contactos con un astillero alemán, *MEYER WERFT GmbH*, conocido por la gran cantidad de cruceros construidos para compañías tan importantes como Royal Caribbean, AIDA cruises o Norwegian Cruise Line. La información proporcionada fue que para un crucero de aproximadamente 4400 personas son necesarios 1000 m³ de volumen de almacenamiento de aguas residuales no tratadas. Por tanto, para un crucero como el Oasis of the Seas serían necesarios unos **1900 m³**.

7. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este proyecto es realizar un estudio sobre la viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un crucero utilizando como biomasa las aguas negras del buque y los residuos procedentes de los restaurantes. Como se ha comprobado, sí es posible la instalación de una planta de estas características y además se pueden lograr unos beneficios que no se conseguirían con una planta de tratamiento de aguas residuales o tanques de almacenaje de residuos.

Con una instalación de este tipo se resolvería el problema de vertido de residuos tratados al mar por parte de los buques. Con una planta de tratamiento de aguas residuales en el buque se puede ahorrar el coste de la instalación de la planta de metanización pero se perjudicará el medio marino de la zona donde se descargue los residuos pudiendo producir grandes alteraciones en los ecosistemas. La otra solución al vertido de aguas con residuos al mar es la instalación de tanques de almacenamiento de residuos. El gran inconveniente de este sistema es que se necesitan grandes espacios para poder ubicar los tanques.

Otro de los objetivos de este proyecto era calcular el espacio utilizado por la planta de metanización y verificar si esta cabría en el espacio utilizado para los tanques de residuos. Como se ha calculado en el capítulo 6 el espacio utilizado por estos tanques es de unos 1900 m³ y el espacio necesario para ubicar la planta de metanización es de 2030 m³. Se puede observar que faltarían unos 130 m³ para que la planta cupiese perfectamente en el espacio utilizado por los tanques, pero es un volumen fácilmente conseguible ya que se podría reducir el tamaño de alguna de las zonas recreativas del buque (piscina, teatro, pista de hielo, etc.). El beneficio global que se obtiene al disponer de una planta de metanización en el buque supera con creces la pequeña pérdida de “diversión” al reducir el tamaño de estas instalaciones lúdicas.

Además de los beneficios medioambientales están los beneficios económicos que se generan al tener esta planta. Por una parte está el ahorro del coste de descarga de los residuos de los restaurantes y las aguas negras al llegar a puerto, ya que son eliminados con el digestor. Como se ha calculado anteriormente, este ahorro puede llegar a ser de más de 132 000 € anuales.

Al fermentar los residuos en el digestor se obtienen dos subproductos que de una manera u otra beneficiaran económicamente los intereses del crucero. El biogás que se produce generará una parte de la energía que necesita el buque, por lo que se reducirá la cantidad de fuel-oil necesario. El ahorro que supone no tener que comprar esa cantidad de fuel-oil puede ser de hasta 170 000 € anuales. El otro subproducto obtenido es el biol, que se puede vender a empresas agropecuarias. El ingreso económico obtenido al vender el biol es de hasta 136 000 € al año.

Con este estudio se determina que los ahorros e ingresos pueden llegar a ser de hasta 438 000 € de beneficios anuales, teniendo en cuenta que una parte de estos beneficios deberá destinarse a amortizar el coste de la instalación, pagar los costes de mantenimiento y personal encargado.

Se concluye, pues, que se trata de un proyecto viable que además aporta beneficios económicos y medioambientales.

8. ÍNDICE TABLAS, GRÁFICAS, ILUSTRACIONES Y ESQUEMAS

8.1. Tablas

Tabla 8 - Composición biogás	10
Tabla 9 - Equivalencias energéticas	11
Tabla 10 - Factores inhibidores	28
Tabla 11 - Biomasa/MS/MV	42
Tabla 12 - Eliminación de sulfhídrico	65
Tabla 13 - Volumen de biogás producido	71
Tabla 14 - Volúmenes elementos planta de metanización	72

8.2. Esquemas

Esquema 1 - Formación del biogás	18
Esquema 2 - Planta metanización	41
Esquema 3 - Triturador fregadero	43
Esquema 4 – Calentamiento biomasa	47
Esquema 5 - Tipos de digestores	49
Esquema 6 - Pared digestor	54
Esquema 7 - Tubería	56
Esquema 8 - Centrifugadora	60

8.3. Gráficas

Gráfica 4 - Producción de biogás/Temperatura	22
Gráfica 5 - TRH/Temperatura	23

Gráfica 6 - Producción biogás/TRH	24
--	-----------

8.4. Ilustraciones

Ilustración 12 - Oasis of the Seas	29
Ilustración 13 - Agitador de alta velocidad	47
Ilustración 14 - Bomba trituradora	48
Ilustración 15 - Tipos de aislantes	52
Ilustración 16 - Agitador de baja velocidad	55
Ilustración 17 - Centrifugadora	59
Ilustración 18 - Tuberías extracción biogás	63
Ilustración 19 - Válvula sobrepresión	63
Ilustración 20 - Cuba de condensados	64
Ilustración 21 - Sistema de control del biogás	66
Ilustración 22 - Antorcha	67

9. BIBLIOGRAFÍA

Libros

- KLINGLER, B. *Environmental aspects of biogás technology*. German biogas Association. 1998
- MONCAYO ROMERO, G. *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. Aqualimpia. 2011
- SAGARDUY, R. *Valorización energética de residuos biodegradables contenidos en los desechos municipales mediante biogasificación*. 1997

Documentación

- AEBIG (Asociación española de biogás). *Futuro del biogás en España*. Madrid: enero 2010
- *Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, de 2 de noviembre de 1973. Convenio MARPOL*.
- Doug Dixon, P.E. y otros. HOLLAND AMERICA LINE WESTOURS CASE STUDY. *Enhanced MARPOL IV sewage and graywater pollution prevention*.
- ENSENADA B.C. *Construcción de un biodigestor como alternativa de generación de energía eléctrica limpia*. Junio 2009
- FABELO FALCÓN, J. ANTONIO y otros. *Diseño de una planta de producción de biogás*. Enero-Marzo 2005
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *End-Used petroleum product prices and average crude oil import costs*. Julio 2011
- ITT Water and Wastewater España. FLYGT. *Soluciones integrales para fluidos*. Catálogo de productos
- MARTÍN GONZALEZ, S. *Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización*. Tesis doctoral. Gijón: octubre 1997
- Ministerio de Industria, Turismo y comercio. IDEA. *Biomasa. Digestores anaerobios*.

- PÉREZ BÁEZ, S.O. y otros. Dpto. de Ingeniería de procesos. *Planta de biometanización de residuos biodegradables*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
- SOGARI, N. y otros. *Diseño de un biodigestor para obtener metano utilizando excrementos de vacas y cerdos en una escuela agrotécnica*. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. 2000

Páginas web

- Biodigestores

www.aebig.org

www.alcion.es

www.bioconstruct.com

www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/disenio-biodigestores-t976/p0.htm

www.envitec-biogas.eu

www.kompogas.ch

- Plantas de tratamiento de aguas residuales

www.nauticexpo.es/fabricante-barco/sistema-tratamiento-aguas-residuales-buques-20272.html

- Planta biogás con excrementos humanos

www.bbc.co.uk/news/uk-11433162

www.gizmag.com/human-waste-to-gas-project-goes-live/16572/

www.youtube.com/watch?v=RJOBkzAb35s

- Otras

www.apfsc.com

www.apmarin.com

www.bilbaoport.es

www.flygt.es

www.ingenierosnavales.com

www.oasisoftheseas.com